

沈晨, 颜鹏, 魏吉鹏, 等. 生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 292-300.

SHEN Chen, YAN Peng, WEI Ji-peng, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 292-300.

生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响

沈晨^{1,2,3}, 颜鹏^{1,3}, 魏吉鹏^{1,2,3}, 张兰^{1,3}, 张丽平^{1,3}, 李鑫^{1,3}, 韩文炎^{1,3*}

(1.中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008; 2.中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3.农业部茶叶质量安全控制重点实验室, 杭州 310008)

摘要:在过去10年中,施用生物质炭降低氮素淋洗正逐渐成为研究热点。为全面总结分析生物质炭在降低农田土壤硝态氮淋洗方面的影响,本文收集了2010—2016年在中国知网和Web of science上发表的相关中英文文献41篇,采用加权平均法对数据进行处理。结果表明:在农业生产过程中,86%的研究数据表明施入生物质炭可降低土壤硝态氮淋洗,且降低比例随生物质炭施入量的增加而升高。同时,98.2%的研究数据显示生物质炭的施入可以减少土壤水分淋溶体积,平均降幅达10.0%。生物质炭的施用效果以在中性土壤(pH=6.48)为最佳,硝态氮的淋失减少量达30.7%。研究表明,生物质炭可以降低土壤硝态氮的淋洗,平均降幅达24.6%,其淋洗效果主要与生物质炭施用量及原材料有关,此外土壤类型、土壤酸碱度等也是相关影响因素。但是目前关于生物质炭对硝态氮淋洗的研究主要集中在室内土柱模拟,未来仍需长期的田间定位试验来进一步验证其作用效果。

关键词:生物质炭;硝态氮;淋洗损失

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)04-0292-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0320

Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soils

SHEN Chen^{1,2,3}, YAN Peng^{1,3}, WEI Ji-peng^{1,2,3}, ZHANG Lan^{1,3}, ZHANG Li-ping^{1,3}, LI Xin^{1,3}, HAN Wen-yan^{1,3*}

(1.Tea Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Hangzhou 310008, China; 2.Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3.Key Laboratory of Tea Quality and Safety Control, Ministry of Agriculture, Hangzhou 310008, China)

Abstract:For the last decades, there has been an increasing interest in using biochar to reduce nitrogen leaching. In order to comprehensively summarize the influence of biochar application on NO_3^- -N leaching, 41 papers published were collected and the data were analyzed by weighted average method. 86% of the research data indicated that biochar application could reduce soil NO_3^- -N leaching, and the reduction percentage increased with the increasing amount of biochar application. 98.2% of the data showed that the application of biochar could reduce the leaching volume of soil water, and the averaged reduction rate was 10.0%. Greater responses were found in neutral soil (pH=6.48), the percentage of leaching loss of nitrate nitrogen was reduced by 30.7%. The results showed that the biochar could reduce the leaching of soil NO_3^- -N with 24.6%, and its leaching effect was mainly related to biochar application rates and the raw materials, in addition, the soil type, soil pH and so on were also influential factors. However, the current researches were focused on soil column, long-term field studies still needed to verify its effect in the future.

Keywords:biochar; nitrate nitrogen; leaching loss

氮素是植物生长发育过程中的必需元素,对农作物的品质形成具有重要影响^[1]。在我国农业生产过程

中,为了提高农作物产量,农民普遍大量施用氮肥,但据数据统计,我国主要粮食作物的氮肥利用程度很低,水稻、小麦和玉米的氮肥利用率仅为28.3%、28.2%和26.1%^[2]。大部分氮素以氨挥发、地表径流、渗漏、氧化亚氮排放等形式损失进入环境,不仅造成了经济损失,还会造成水体富营养化和温室效应等各种环境问题^[3]。朱兆良^[4]对我国农田化肥氮的去向作了初

收稿日期:2017-12-12 录用日期:2018-01-25

基金项目:中国农业科学院科技创新工程协同创新项目(CAAS-XTCX 2016015)

作者简介:沈晨(1993—),女,江苏南通人,硕士研究生,从事茶园土壤研究。E-mail:shenolivia@163.com

*通信作者:韩文炎 E-mail:hanwy@triacass.com

步统计,研究结果表明作物吸收大概在 35%左右,淋洗损失约占 2%,径流损失占 5%。氮肥施入土壤后,通过硝化作用转变为 NO_3^- , NO_3^- 带负电荷,是较易被淋洗的氮形式, NH_4^+ 带正电荷,易被土壤胶体吸附。陈心想等^[9]通过土柱试验模拟氮素淋失,研究表明在整个淋洗过程中,氮素主要以硝态氮形式淋失,累积淋失量占硝铵淋失总量的 97.3%。硝态氮淋洗会严重污染地下水,金铭^[6]对中国 57 座城市进行调查,有 46 座城市的地下水氮超标。董章杭等^[7]对山东寿光蔬菜种植区的 653 个地下水水样的检测结果表明,该地区全年平均硝态氮含量高达 $22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此,降低硝态氮淋洗损失对于降低农田氮素损失、提高农田氮肥利用率,实现我国农业绿色、高效、可持续发展具有重要意义。

生物质炭(Biochar)是指生物质在缺氧条件下通过热化学转化得到的固态产物^[8],其比表面积大、孔隙结构发达,具有高度稳定性和较强的吸附性能。近年来,生物质炭作为土壤调理剂被广泛应用于农业生产中,不仅可以改善土壤质量,还能吸附固持土壤中的养分,从而减少农田土壤养分流失^[9-10]。周志红等^[11]以玉米秸秆为原料,通过淋洗试验研究生物质炭对硝态氮淋溶的影响,结果表明,生物质炭施入使紫色土硝态氮的淋失量降低 70%。但是 Bruun 等^[12]研究小麦和稻草生物质炭对砂土氮素淋失的影响的结果表明,生物质炭对土壤累积硝态氮和铵态氮的淋失没有显著影响。

目前关于生物质炭对农田土壤硝态氮淋洗影响方面的文献有很多,包括不同的生物质炭种类和用量,以及在不同土壤类型上的研究等,大多数文献报道生物质炭能够降低土壤硝态氮淋洗损失,但是效果不一^[13-14]。另外,不同生物质炭用量以及不同土壤类型对降低硝态氮淋洗损失的效果也不一^[15-16]。本文拟通过对 2010—2016 年以来生物质炭输入对土壤硝态氮淋洗影响方面文献的分析,全面总结生物质炭在降低硝态氮淋洗方面的应用发展,进一步从生物质炭用量、土壤类型等方面研究生物质炭对硝态氮淋洗损失的影响因素,并对生物质炭在降低土壤硝态氮淋洗方面的效果进行总体评价。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文以生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响为研究对象,筛选收集了 2010—2016 年中国知网和 Web of science 上发表的相关文献,共计 41 篇,其中中文

文献 23 篇,外文文献 18 篇。筛选标准为至少包括两个生物质炭用量处理,涵盖主要土壤类型,土壤 pH 包含范围为 4.07~9.04,主要发表于核心期刊。以这些文献作为分析的数据集,应用 Sigmaplot 12.5 和 Excel 2010,完成生物质炭对硝态氮损失的影响分析。表 1 综合了各参考文献的土壤类型、pH 值和制作生物质炭的原料等基本信息。

1.2 数据处理

为了综合比较生物质炭对土壤硝态氮淋洗损失的影响,将各文献的数据结果,均转化为百分比进行比较。详细的计算转化方法如下:

淋溶液体减少百分比=(对照处理的淋溶液体积分-生物质炭处理淋溶液体积分)/对照处理的淋溶液体积分 $\times 100\%$

硝态氮淋溶量减少百分比=(对照处理的硝态氮淋溶量-生物质炭处理硝态氮淋溶量)/对照处理的硝态氮淋溶量 $\times 100\%$

试验数据分析和图表制作采用 Sigmaplot 12.5 和 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对土壤硝态氮淋洗的应用现状

2010—2016 年中国知网和 Web of science 收录的关于生物质炭对硝态氮淋洗的文献分析结果(表 1)表明,近年来关于生物质炭对土壤硝态氮淋洗的研究较多,涉及到红壤、黑土和灌淤土等多种土壤类型,其中研究最多的是灌淤土和红壤,占到中文文献的 19.0%和 28.6%。生物质炭的制备原料较丰富,常见的有秸秆类生物质炭、木本类生物质炭,还包括一些工业和生活废弃物。我国是世界农业大国,秸秆和稻壳是主要的农副产物,从表 1 可以看出,生物质炭的制备原料以秸秆类居多,占到文献总量的 41.5%,其次为树木枝条。所用生物质炭多为碱性, pH5.20~10.45。

2.2 生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影响

从文献中筛选得到的与生物质炭施入对土壤硝态氮淋洗相关的文献共 37 篇,共总结筛选得到 186 个相关数据。从图 1 可以看出,与对照相比,经生物质炭处理后,土壤硝态氮淋洗减少量平均值为 24.6%,最大减少量为 90.1%。其中 86.0%的生物质炭处理可以降低土壤硝态氮淋洗量,但同时有 14.0%的生物质炭处理增加了土壤硝态氮的淋洗量。

2.3 生物质炭对土壤淋溶液体积分的影响

对于生物质炭对土壤淋洗液体积分方面的研究,本

表 1 2010—2016 年所涉文献基本情况

Table 1 Basic information of the literature from 2010 to 2016

土壤类型	土壤 pH	生物质炭原料	生物质炭 pH	生物质炭用量/%	施氮种类及用量	文献来源
灌淤土	8.78	稻壳	7.78	0、1、2、5、10	尿素 240 kg·hm ⁻²	惠锦卓等 ^[17]
灌淤土	8.49	稻壳	—	0、2、3、4	尿素 300 kg·hm ⁻²	张爱平等 ^[18]
灌淤土	8.49	稻壳	—	0、2、3、4	氮肥 240 kg·hm ⁻²	刘汝亮等 ^[19]
灌淤土	7.62	玉米秸秆	10.45	0、1、5、10	尿素 0.14%	杨 放等 ^[20]
红壤	6.08	玉米秸秆	8.40	0、10、20、40	—	李江舟等 ^[21]
红壤	4.07	茶树	10.81	0、3.56、7.11、14.22、28.44	尿素 300 kg·hm ⁻²	王 峰等 ^[16]
红壤	4.54	小麦秸秆	10.35	0、2.22、2.45、8.95、13.37、17.80	硝酸钾、氯化铵	靖 彦等 ^[22]
红壤	6.08	玉米秸秆	—	0、10、20、40	氮肥 0.6%	李江舟等 ^[23]
菜地红壤	5.18	玉米秸秆	10.08	0、0.5、2、4、6、8	尿素 300 kg·hm ⁻²	高德才等 ^[24]
菜地土壤	6.18	玉米秸秆	7.89	0、2、4、6	硝酸钾 200 kg·hm ⁻²	李卓瑞等 ^[15]
潮褐土	8.50	作物秸秆	—	0、2.5、5、10	硝酸钾 210 kg·hm ⁻²	李际会等 ^[25]
潮褐土	8.10	玉米秸秆	10.00	0、1、2、4	尿素 450 kg·hm ⁻²	盖霞普等 ^[26]
砂壤	6.80	苹果枝条	7.80	0、11	铵态氮复合肥 0.66%	张瑞清等 ^[27]
		稻壳	8.10			
白浆土	5.71	玉米棒芯	9.83	0、2、4	尿素 75 kg·hm ⁻²	张千丰等 ^[28]
黑土	6.93					
黑土	6.75	玉米秸秆	—	0、2	硝酸铵 108 kg·hm ⁻²	李美璇等 ^[29]
黑土	5.57	秸秆	9.82	0.6、1.2、3.6、6	硝酸钾 0.02%	王 冰等 ^[30]
		稻壳	8.48			
		松木	8.08			
黑钙土	8.50	玉米秸秆	10.30	0、1、5、10	尿素 240 kg·hm ⁻²	周志红等 ^[11]
紫色土	8.60					
壤土	8.11	果树枝条	10.43	0、8.89、17.78、26.67、35.56	尿素 225 kg·hm ⁻²	陈心想等 ^[15]
砖红壤	4.59	椰壳	—	0、1、2、5	尿素 0.008%	赵凤亮等 ^[31]
棕壤土	5.40	玉米秸秆	—	0、2	氮肥 250 kg·hm ⁻²	葛顺峰等 ^[32]
黄棕壤	5.32	稻壳	—	0、1、3、5	氯化铵 0.11%	刘玮晶等 ^[33]
培养基质	—	竹子	8.15	0、1、3、5	复合肥	陈重军等 ^[34]
		水稻秸秆	9.43			
		烟草秆	7.00			
—	—	牛粪	9.55	0、2、3、4、5	尿素 260 kg·hm ⁻²	吴 丹等 ^[35]
淋溶土	4.62	稻壳	9.12	0、1、5	尿素 675 kg·hm ⁻²	Zhao 等 ^[36]
氧化土	4.32					
棕壤	—	猪粪	9.60	0、8	—	Troy ^[37]
		树木	9.30			
水藓泥炭苔藓:珍珠岩	—	—	—	0、1、5、10	—	Altland 等 ^[38]
壤质土	—	橡木和山核桃的混合硬木	7.60	0、0.1、0.5、1、2	—	Laird 等 ^[10]
砂壤	—	牧豆树	6.50	0、10	—	Barnes 等 ^[39]
富含有机质的表层土						
黏壤土						
—	6.37	鸡粪	9.00	0、6.67、13.33	—	Widowati 等 ^[40]
		有机垃圾	9.60			
淋溶土	4.62	稻草秸秆	9.12	0、5	尿素 675 kg·hm ⁻²	Zhao 等 ^[41]
氧化土	4.32					
雏形土	8.46					
干旱土	9.04					

表 1 2010—2016 年所涉文献基本情况(续)
Table 1 Basic information of the literature from 2010 to 2016(continued)

土壤类型	土壤 pH	生物质炭原料	生物质炭 pH	生物质炭用量/%	施氮种类及用量	文献来源
砂壤	—	花生壳	8.60	0、2.2	硝酸铵 140 kg·hm ⁻²	Schomberg 等 ^[42]
		山核桃壳	7.20			
		家禽垃圾	10.30			
		柳枝	8.00			
		硬木	5.70			
淋溶土	6.13	家禽粪	9.20	0、7.69	硝酸铵 90 kg·hm ⁻²	Singh 等 ^[43]
变性土	8.80	木材	6.93			
砂壤	—	刺槐	8.60	0、0.45、0.89	硝态氮肥 215.4 kg·hm ⁻²	Uzoma 等 ^[44]
砂壤	—	小麦秸秆	—	0、2	氯化铵 300 kg·hm ⁻²	Bruun 等 ^[12]
砂壤	6.6	—	9.90	0、2	—	Raave 等 ^[45]
砂壤	6.7	梧桐	—	0、2	硝酸铵 0.033%	Angst 等 ^[46]
砂壤	5.6	—	7.80	—	—	Knowles 等 ^[47]
钙积土	7.2	果树枝条	9.80	0、4.44	—	Ventura 等 ^[48]
粗切农业砂	5.3	桉木	7.30	0、11.11	硫酸铵 40 kg·hm ⁻²	Dempster 等 ^[49]
砂壤	—	甘蔗渣	7.90	0、2	硝酸铵	Yao 等 ^[13]
		花生壳	8.20			
		巴西椒木	6.60			
		竹炭	5.20			

文通过文献搜集得到 12 篇相关文献,共 57 个数据。由图 2 可知,98.2%的数据显示生物质炭的施入可以降低土壤水分淋失,平均降低率达 10.0%,最高可达 37.2%。由此可见,绝大部分研究中生物质炭的施入显著提高了土壤的持水能力,这可能是因为生物质炭的比表面积较大,孔隙结构发达。

对淋溶液体积减少百分比与硝态氮减少百分比进行相关性分析(图 3),结果表明硝态氮含量的变化与淋溶液体积的变化呈显著正相关($P<0.01$)。降雨和灌溉是土壤养分淋失的主要动力,生物质炭对水分有吸附固持的作用,从而通过切断硝态氮的迁移载体来

降低硝态氮淋溶损失。

2.4 生物质炭用量对土壤硝态氮淋失的影响

从文献中选出 23 篇包含至少 3 种以上生物质炭用量处理的相关文献,按照生物质炭用量小于 2%、2%~5%和大于 5%划分为低水平用量、中水平用量和高水平用量三类,其生物质炭平均用量分别为 1.38%、3.61%和 7.18%。从表 2 可以看出,硝态氮淋洗减少量随着生物质炭用量的增加而增加。在生物质炭用量为 1.38%的低用量下,可以降低 13.5%的硝态氮淋洗损失。当生物质炭用量分别增加到 3.61%和 7.18%时,土壤硝态氮的淋洗减少量分别提高到

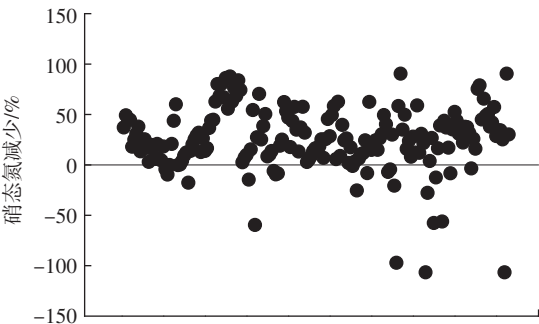


图 1 生物质炭施入对硝态氮淋洗的影响
Figure 1 The effect of biochar application on NO₃⁻ leaching

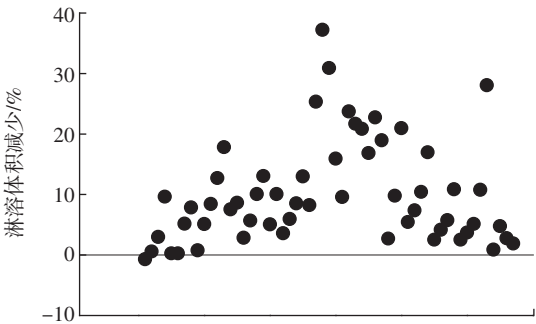


图 2 生物质炭施入对土壤淋溶液体积分的影响
Figure 2 The effect of biochar application on leachate volume

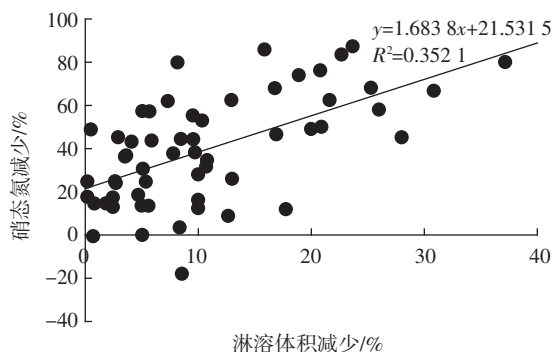


图 3 淋溶液体积减少百分比与硝态氮减少百分比的相关性

Figure 3 The relationship between leachate volume and nitrate reduction

27.1%和 34.2%。

2.5 土壤 pH 值对土壤硝态氮淋溶的影响

综合文献中不同土壤类型,土壤 pH 分为酸性土壤、中性土壤和碱性土壤,平均土壤 pH 值分别为 4.98、6.48 和 8.47。从表 3 可以看出在不同的土壤 pH 条件下,生物质炭施入均会减少硝态氮的淋洗损失,但减少效果不一。当土壤呈中性(pH=6.48)时,对降低硝态氮淋洗效果最佳,达到 30.7%;其次为碱性土壤(pH=8.47),达 23.2%。而在酸性土壤下,施用生物质炭后对土壤硝态氮淋洗损失的降低率仅为 17.8%。

3 讨论

综合上述研究结果发现,86%的数据结果表明生物质炭施入土壤中,可以减少硝态氮淋溶损失,减轻地下水污染。首先,生物质炭可以通过吸附铵态氮减

少土壤中硝态氮含量。铵态氮是硝化反应的底物,土壤中铵态氮含量的变化直接影响了氮平衡,减少土壤中可淋失硝态氮含量。生物质炭表面含氧官能团较丰富,施入土壤后,可以提高土壤的阳离子交换量,通过离子键和共价键连接为养分提供吸附位点^[8-9]。刘玮晶等^[33]发现生物质炭以 1%、3%和 5%的比例添加后,土壤铵态氮淋失量分别减少 22%、39%和 47%,氮素滞留量分别增加了 15%、5%和 14%,这表明生物质炭的施入可以提高土壤对铵态氮的吸附能力。另外,生物质炭也可以通过直接吸附硝态氮来降低硝态氮的淋洗。生物质炭具有高比表面积,孔隙结构发达,可以吸附土壤中的无机离子,如硝态氮等^[50]。王冰等^[51]将玉米秸秆、稻壳和落叶松木制备的生物质炭施入黑土后发现,与对照相比,施用生物质炭可增加黑土对硝态氮的吸附能力,施用 3.6%的生物质炭吸附能力最强,分别达到 0.929、0.802、0.587 mg·g⁻¹。

土壤氮素损失的方式主要是硝态氮淋洗,而水分是硝态氮迁移的主要载体。在本文中,文献分析结果表明添加生物质炭处理的淋溶液体积显著低于对照处理。生物质炭具有发达的孔隙结构,比表面积大,生物质炭的孔隙结构可以保持水分,减少水分的渗漏速度,从而减少养分的淋失^[52]。袁金华等^[53]认为,生物质炭可以改变土壤孔径和分布情况,生物质炭独特的孔隙结构可以减小水分的渗漏速率,从而改变土壤水分的停留时间和渗滤模式。

目前大部分研究发现生物质炭能够降低土壤硝态氮的淋洗损失,但是也有一小部分研究发现生物质炭促进了硝态氮的淋洗损失(图 1),可能是由于受到生物质炭添加量、土壤类型等因素的综合影响。刘玉学等^[54]认为添加不同用量的生物质炭对土壤硝态氮淋溶损失效果不一。本文的文献分析结果表明,与不施生物炭相比,生物质炭施用量为 1.38%、3.61%和 7.18%时,硝态氮的淋失量分别降低 13.5%、27.1%和 34.2%。生物质炭的添加显著降低了土壤硝态氮的淋溶,但其添加效果与施用量显著相关,硝态氮淋失量

表 3 土壤 pH 对生物质炭调控硝态氮淋溶损失的影响

Table 3 Effect of soil pH on NO₃⁻ leaching loss regulated by biochar

土壤类型	样本数	平均土壤 pH	硝态氮淋洗减少量/%
酸性土壤	5	4.98	17.8
中性土壤	4	6.48	30.7
碱性土壤	5	8.47	23.2

表 2 生物质炭用量对土壤硝态氮淋失的影响

Table 2 Effect of biochar consumption on NO₃⁻ leaching

生物质炭用量	样本数量	硝态氮淋洗减少量/%					
		平均数	最小值	较小四分位数	中位数	较大四分位数	最大值
低水平用量(1.38%)	23	13.5	-60.0	6.0	16.5	26.4	43.3
中水平用量(3.61%)	23	27.1	-10.0	12.9	24.7	46.2	57.3
高水平用量(7.18%)	23	34.2	-0.5	19.9	31.6	51.7	70.0

随着生物质炭施用量的增加,呈现“报酬递减”现象,生物质炭的施用水平从低水平增加到中水平时,硝态氮减少量增加了 100.7%,但从中水平上升至高水平时,硝态氮减少量仅增加了 26.2%。李江舟等^[21]采用土柱淋洗模拟方法研究不同生物质炭添加量对土壤中氮淋溶损失时发现,与对照相比,生物质炭添加量为 10%、20%和 40%时,硝态氮淋失总量分别降低 13%、18%和 25%,这是因为生物质炭对氮素具有吸附作用,生物质炭含量升高,吸附固持能力加强。然而,在生物质炭添加比例较低的情况下,硝态氮的淋溶量也可能会增加。周志红等^[11]研究发现,在生物质炭为 1%的较低用量处理下,黑钙土和紫色土的硝态氮淋洗损失增加 22%和 2%。陈心想等^[5]研究表明在整个淋洗过程中,生物质炭施用量为 20、40 t·hm⁻²和 60 t·hm⁻²(相当于 8.89%、17.78%、26.67%)的硝态氮累积淋溶量均高于对照处理,只有 80 t·hm⁻²(35.56%)用量处理较对照降低了 18.6%。这可能是由生物质炭制备材料不同造成的,试验中选用的生物质炭原材料为废弃的果树枝条,孔隙结构发达但大小不一,对硝态氮的吸附能力弱,而施用生物质炭造成对土壤的扰动作用促进土壤水分的下移从而增加硝态氮淋洗。因此,只有 80 t·hm⁻²(35.56%)的生物质炭用量水平对硝态氮有较强的吸附保留作用。陈重军等^[34]研究竹子、水稻秸秆和烟草秆制备成的生物质炭对土壤氮磷流失的影响,结果表明,在所有处理中,竹炭的效果最佳。这主要是因为竹炭具有巨大的比表面积,增加对氮磷的吸附,减少养分通过生物质炭进行的迁移。

此外,研究发现不同的土壤类型也会影响生物质炭对硝态氮淋洗损失的效果^[11,36,41]。这可能是因为土壤质地、矿物组成不同,生物质炭对土壤中氮素转换和吸附等作用受到影响^[14,18]。张千丰等^[28]研究发现,向白浆土和黑土中添加 2%和 4%的玉米棒芯生物质炭,与对照相比,白浆土的硝态氮淋失量分别降低了 12.34%和 26.0%,黑土的硝态氮淋失量分别降低了 13.5%和 16.2%。这可能是因为生物质炭的施入可以降低土壤密度,增大土壤孔隙度,保持更多的水分。Singh 等^[43]在两种不同类型土壤中添加稻壳炭,研究其对硝态氮淋失的影响时发现,淋溶土中的硝态氮淋失量显著高于变性土,这可能是因为土壤自身理化性质不同,对铵态氮和硝态氮的吸附固定能力不同,变性土中存在高电荷的蒙脱石,可以吸附固定 NH₄⁺,降低硝化速率^[55]。

另有研究发现,不同形态的氮肥施用下生物质炭施入对土壤氮素转化过程也有影响。从表 1 可以看出,施用的氮肥种类多为尿素,其次为硝态氮肥。袁瑞娜等^[56]在研究生物质炭与不同形态氮肥配施对黄绵土氮素矿化的影响时发现,旱地施用酰胺态氮肥和生物质炭可以降低土壤无机氮累积量。张千丰等^[28]研究表明,与未添加生物质炭相比,添加生物质炭处理的硫酸铵、硝酸钾和尿素的白浆土的硝态氮淋溶量分别减少 2%、14%和 8%,在黑土中分别减少 5%、18%和 12%。

4 结论

本文通过综合分析生物质炭对农田土壤硝态氮淋洗损失方面的研究发现,绝大多数生物质炭施用于土壤中可明显减少硝态氮的淋失,增强土壤的保肥能力。从土壤水分运移的角度来讲,生物质炭可以显著增加土壤持水能力,降低土壤水分的流失,从而降低硝态氮淋洗损失。另外,随着生物质炭用量的增加,土壤硝态氮淋洗损失不断降低。此外,生物质炭对土壤硝态氮淋洗损失的影响在不同土壤之间也存在一定的差异,在中性土壤中,生物质炭施入对减少硝态氮淋洗效果最佳。生物质炭对土壤硝态氮淋溶损失的影响过程较为复杂,受土壤类型、生物质炭制备材料、生物质炭添加量等诸多因素的影响。目前关于生物质炭对土壤硝态氮淋洗损失的影响的报道主要集中在室内模拟土柱研究,生物炭对降低土壤硝态氮淋洗损失的影响仍需在田间条件下进一步验证。

参考文献:

- [1] Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. Third Edition. Beijing: Science Press, 2013: 135-136.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 葛鑫,戴其根,霍中洋,等. 农田氮素流失对环境的污染现状及防治对策[J]. 耕作与栽培, 2003(1): 53-54.
GE Xin, DAI Qi-gen, HUO Zhong-yang, et al. Countermeasures to curb pollution due to nitrogen loss in farmland[J]. *Tillage and Cultivation*, 2003(1): 53-54.
- [4] 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.
- [5] 陈心想,何绪生,张雯,等. 生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 110-

114.
CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, ZHANG Wen, et al. Effects of quantity of biochar on nitrogen leaching in simulated soil columns and soil moisture parameters in field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 110-114.
- [6] 金 铭. 中国地下水污染危机[J]. 生态经济, 2013(5): 12-17.
JIN Ming. Groundwater pollution crisis in China[J]. *Ecological Economy*, 2013(5): 12-17.
- [7] 董章杭, 李 季, 孙丽梅. 集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究——以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1139-1144.
DONG Zhang-hang, LI Ji, SUN Li-mei. Nitrate contamination in the groundwater of intensive vegetable cultivation areas in Shouguang City, Shandong Province China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1139-1144.
- [8] 陈温福, 张伟明, 孟 军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2): 83-89.
- [9] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [10] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 436-442.
- [11] 周志红, 李心清, 邢 英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.
ZHOU Zhi-hong, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284.
- [12] 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.
- [13] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [14] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [15] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 333-338.
LI Zhuo-rui, WEI Gao-ling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2016, 25(2): 333-338.
- [16] 王 峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 生物黑炭对强酸性茶园土壤氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 111-115.
WANG Feng, CHEN Yu-zhen, YOU Zhi-ming, et al. Effect of biochar addition on nitrogen leaching in strong acid tea garden soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 111-115.
- [17] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.
HUI Jin-zhuo, ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, et al. Effect of biochar on soil nutrients and nitrogen leaching in anthropogenic-alluvial soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2): 156-161.
- [18] 张爱平, 刘汝亮, 高 霁, 等. 生物炭对灌淤土氮素流失及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2395-2403.
ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, GAO Ji, et al. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic-alluvial soil irrigated with yellow river water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12): 2395-2403.
- [19] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 生物炭对引黄灌区水稻产量和氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 208-212.
LIU Ru-liang, ZHANG Ai-ping, LI You-hong, et al. Effect of biochar application on rice yield and nitrogen leaching losses in yellow river irrigation region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 208-212.
- [20] 杨 放, 李心清, 邢 英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.
YANG Fang, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in saline soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 972-977.
- [21] 李江舟, 姜翼来, 张立猛, 等. 不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1075-1080.
LI Jiang-zhou, LOU Yi-lai, ZHANG Li-meng, et al. Leaching loss of nutrients in tobacco-planting soil under different biochar adding levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1075-1080.
- [22] 靖 彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 265-269.
JING Yan, CHEN Xiao-min, LI Qiu-xia, et al. Effects of biochar on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 265-269.
- [23] 李江舟, 张庆忠, 姜翼来, 等. 施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 48-53.
LI Jiang-zhou, ZHANG Qing-zhong, LOU Yi-lai, et al. Effects of biochar addition on nutrient leaching loss of typical tobacco-planting soils in Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1): 48-53.
- [24] 高德才, 张 蕾, 刘 强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 54-61.
- [25] 李际会, 吕国华, 白文波, 等. 改性生物炭的吸附作用及其对土壤硝态氮和有效磷淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 220-225.
LI Ji-hui, LÜ Guo-hua, BAI Wen-bo, et al. Effect of modified biochar on soil nitrate nitrogen and available phosphorus leaching[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 220-225.
- [26] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失

- 风险的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):310-318.
- GAI Xia-pu, LIU Hong-bin, ZHAI Li-mei, et al. Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):310-318.
- [27] 张瑞清, 孙 晓, 杨剑超, 等. 两种生物质炭对果园土壤氮素淋失、滞留的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(32):233-237.
- ZHANG Rui-qing, SUN Xiao, YANG Jian-chao, et al. Effects of two types of biochar on soil nitrogen leaching and retention in apple orchard[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(32):233-237.
- [28] 张千丰, 元 野, 刘居东, 等. 室内模拟: 生物炭对白浆土和黑土中氮素淋溶的影响[J]. 土壤与作物, 2013, 2(2):88-96.
- ZHANG Qian-feng, YUAN Ye, LIU Ju-dong, et al. Effects of a biochar on nitrogen leaching in an albic soil and black soil: A simulating lab experiment[J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(2):88-96.
- [29] 李美璇, 王观竹, 郭 平. 生物炭对冻融黑土中铵态氮和硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7):1360-1367.
- LI Mei-xuan, WANG Guan-zhu, GUO Ping. Effects of biochar on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen leaching from black soil under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1360-1367.
- [30] 王 冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):73-79.
- WANG Bing, ZHAO Shan-shan, QIN Zhi-jia, et al. Effects of biochar addition on leaching of nitrate nitrogen in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):73-79.
- [31] 赵凤亮, 邹雨坤, 朱治强, 等. 施用椰壳生物炭对砖红壤氮素淋失和油麦菜吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(s1):400-404.
- ZHAO Feng-liang, ZOU Yu-kun, ZHU Zhi-qiang, et al. Impacts of biochar addition on nitrogen leaching and use efficiency of leaf-used lettuce[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(s1):400-404.
- [32] 葛顺峰, 周 乐, 门永阁, 等. 添加不同碳源对苹果园土壤氮磷淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):31-35.
- GE Shun-feng, ZHOU Le, MEN Yong-ge, et al. Effect of carbon application on nitrogen and phosphorus leaching in apple orchard soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2):31-35.
- [33] 刘玮晶, 刘 烨, 高晓荔, 等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):962-968.
- LIU Wei-jing, LIU Ye, GAO Xiao-li, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):962-968.
- [34] 陈重军, 刘凤军, 冯 宇, 等. 不同原料来源生物质炭对蔬菜种植土壤氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12):2336-2342.
- CHEN Chong-jun, LIU Feng-jun, FENG Yu, et al. Effects of applications of different biochars on nitrogen and phosphorous losses in vegetable soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2336-2342.
- [35] 吴 丹, 林静雯, 张 岩, 等. 牛粪生物炭对土壤氮肥淋失的抑制作用[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):458-463.
- WU Dan, LIN Jing-wen, ZHANG Yan, et al. Inhibitory effects of dairy manure biochar on soil nitrogen leaching[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2):458-463.
- [36] Zhao X, Wang S Q, Xing G X. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: Laboratory incubation and column leaching studies[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2014, 14(3):471-482.
- [37] Troy S M, Lawlor P G, Flynn C J O, et al. The impact of biochar addition on nutrient leaching and soil properties from tillage soil amended with pig manure[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(3):1900.
- [38] Altland J E, Locke J C. Biochar affects macronutrient leaching from a soilless substrate[J]. *Horticultural Science*, 2012, 47(8):1136-1140.
- [39] Barnes R T, Gallagher M E, Masiello C A, et al. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(9):e108340.
- [40] Widowati W, Utomo H, Soehono L A, et al. Effect of biochar on the release and loss of nitrogen from urea fertilization[J]. *Journal of Agriculture and Food Technology*, 2011, 1(7):127-132.
- [41] Zhao X, Yan X Y, Wang S Q, et al. Effects of the addition of rice-straw-based biochar on leaching and retention of fertilizer N in highly fertilized cropland soils[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2013, 59(5):771-782.
- [42] Schomberg H H, Gaskin J W, Harris K, et al. Influence of biochar on nitrogen fractions in a coastal plain soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4):1087-1095.
- [43] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1224-1235.
- [44] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(3/4):1137-1143.
- [45] Raave H, Keres I, Kauer K, et al. The impact of activated carbon on NO_3^- -N, NH_4^+ -N, P and K leaching in relation to fertilizer use[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):120-127.
- [46] Angst T E, Patterson C J, Reay D S, et al. Biochar diminishes nitrous oxide and nitrate leaching from diverse nutrient sources[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(3):672-682.
- [47] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17):3206-3210.
- [48] Ventura M, Sorrenti G, Panzacchi P, et al. Biochar reduces short-term nitrate leaching from a horizon in an apple orchard[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1):76-82.
- [49] Dempster D N, Jones D L, Murphy D V. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil[J]. *Soil Research*, 2012, 50(3):216-221.
- [50] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):255-257.
- [51] 王 冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土吸附-解吸硝态氮性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1):115-121.

- WANG Bing, ZHAO Shan-shan, QIN Zhi-jia, et al. Effect of biochar on adsorption-desorption characteristics of nitrogen in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1):115-121.
- [52] Karhu K, Mattila T, Bergström 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.
- [53] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):779-785.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785.
- [54] 刘玉学, 吕豪豪, 石 岩, 等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1):304-310.
- LIU Yu-xue, LÜ Hao-hao, SHI Yan, et al. Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):304-310.
- [55] Singh B, Heffernan S. Layer charge characteristics of smectites from vertosols (vertisols) of New South Wales[J]. *Soil Research*, 2002, 40(7):1159-1170.
- [56] 袁瑞娜, 赵 英, 张阿凤, 等. 生物质炭与不同形态氮肥配施对黄绵土氮素矿化的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4):69-74.
YUAN Rui-na, ZHAO Ying, ZHANG A-feng, et al. Effects of biochar additions combined with three nitrogen fertilizer levels on soil nitrogen mineralization in loessal soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4):69-74.