

DOI: 10.5846/stxb201412052414

王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 刘宏斌. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展. 生态学报, 2016, 36(19): 5998-6011.

Wang H Y, Gai X P, Zhai L M, Liu H B. Effect of biochar on soil nitrogen cycling: a review. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 5998-6011.

生物炭对土壤氮循环的影响研究进展

王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 刘宏斌*

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081

摘要:在定性资料调研的基础上, 基于 ISI Web of Science 数据库, 采用文献计量学方法, 针对“生物炭对土壤氮循环的影响”及其分支技术进行文献检索、数据整理、分类以及主题分析, 从国际整体研究态势和分支技术主题两个角度探讨了目前国内外生物炭影响土壤氮循环方面的研究进展, 并从生物炭对土壤 N_2O 排放、肥料利用率、硝化速率、 NH_4^+/NH_3 吸附、 NO_3^- 吸附以及土壤微生物氮素固持等 6 个方面的影响进行了详细论述。近年来, 生物炭对土壤氮循环的影响研究急剧升温, 发文量逐年增加, 截止 2014 年 6 月, SCI 数据库中共检索到 2468 篇论文。其中, 期刊论文 2188 篇、综述性论文 93 篇, 其它类论文 177 篇。美国、加拿大、英国等欧美国家在该领域的研究中占有明显优势, 而自 2010 年以来, 中国已成为该领域全球第一的年发文大国。发文热点主要集中在生物炭对土壤 N_2O 排放和对氮肥利用率的影响 2 个方面, 占总发文量的 73.7%。从 6 个方面的分支技术主题来看, 生物炭的影响作用争议性较大。大部分研究认为, 生物炭能够抑制土壤 N_2O 排放、提高氮肥利用率、促进土壤硝化速率、提高土壤对 NH_4^+/NH_3 和 NO_3^- 的固持作用以及土壤微生物氮素固持作用等, 但也有研究表明生物炭会促进土壤 N_2O 排放、抑制土壤硝化速率, 且不具备 NO_3^- 固持能力。这主要与生物炭的类型、老化过程, 以及土壤类型及其含水孔隙率等密切相关。总之, 探讨了生物炭对土壤氮循环影响的研究动态、热点及主要结论, 为深入了解生物炭对土壤理化特性影响的作用机制提供了一定研究思路, 为生物炭的农业应用提供了一定借鉴和参考。

关键词:生物炭; 土壤氮循环; 文献计量学

Effect of biochar on soil nitrogen cycling: a review

WANG Hongyuan, GAI Xiapu, ZHAI Limei, LIU Hongbin*

Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/ Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: This mini-review paper based on the ISI Web of Science database and employed the literature retrieval metrology in combination with inventory of qualitative data and summarized the effects of biochar on soil nitrogen cycling. Based on the effects of biochar on soil nitrogen cycling and searching of branch topics, data arrangement, paper classification and topics analysis, this paper gave a detailed overview of research progress of biochar effect on soil nitrogen cycling overall international research status as well as in different branch topics both in China and abroad. The main aspects included were: biochar effect on N_2O emission, nitrogen use efficiency, nitrification rates, adsorption of soil inorganic nitrogen (ammonium/ammonia and nitrate) and nitrogen retention by microbes. Nowadays, the developments of effects of biochar on soil nitrogen cycling were quickly and the number of published papers were also increased. ISI Web of Science database were used as a basis to retrieve the Scientific Citation Indexed (SCI) papers and a total of 2468 SCI articles were published until June 2014, including articles (2188), review papers (93) and others (177). The European and America countries such as America, Canada and Britain occupied the obvious advantages in this researching field and China has become the first country to published papers in this field since 2010. Meanwhile, the papers mainly focused on effects of biochar on soil

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303095); 国家自然科学基金资助项目(41301311)

收稿日期: 2014-12-05; 网络出版日期: 2016-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhongbin@caas.cn

N_2O emission and nitrogen use efficiency, accounting for 73.7% of the total number. From the perspective of the above six branches, it is controversial about the effects of biochar on them. Most of the reports indicated that biochar could inhibit soil N_2O emission, and improve the nitrogen use efficiency, the soil nitrification rate, the retention of $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3/\text{NO}_3^-$ and soil nitrogen assimilation by microbes. However, some contrary studies suggested that biochar could increase soil N_2O emission, inhibit soil nitrification rate and have no ability to adsorb NO_3^- . Biochar type, biochar aging, soil type and soil water porosity were the main factors affecting the influence of biochar on soil nitrogen cycling. This paper discussed the dynamic and hot pots together with some main conclusions of biochar affecting soil nitrogen cycling comprehensively. It sheds lights on a better understanding of mechanisms of biochar effects on soil physiochemical properties. Moreover, it provides some certain references to agriculture application for biochar.

Key Words: biochar; soil nitrogen cycling; literature retrieval metrology

科学界对生物炭的研究源于南美亚马逊盆地黑土(Terra Preta)的发现^[1]。生物炭是指在无氧或少氧条件下各种生物质(木材、草、玉米秆、麦秆、种壳、粪便、树叶等)经过高温处理,部分生物质转化为油和气后产生的一类富碳产物^[2]。生物炭含碳量丰富,具有高度的物理稳定性、生物化学抗分解性^[2-3]以及具有较大的比表面积、多孔结构^[4]等优良特性,不但有利于农田土壤固持养分,提高养分利用率^[5-6],而且储存于土壤,能大幅度提升土壤碳库,是碳封存的一个重要手段^[7-9]。另外,有研究指出生物炭能够减少 N_2O 和 CH_4 等温室气体的排放^[10], Wolf 等^[11]认为,全面应用生物炭能够削减 12% 的人为产生温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)。

陆地生态系统中,大气中的氮通过生物同化作用或物理、化学作用进入土壤,转化为土壤和水体的生物有效氮—铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$),然后土壤和水体中的生物有效氮又回归到大气中,这种氮素的形态变化和运移过程构成了土壤氮循环(图 1)^[12]。对农田生态系统氮循环过程来讲,土壤 N_2O 排放、氮肥利用、硝化反应、 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 的吸附、 NO_3^- 的吸附以及微生物的氮素固持等 6 个主要过程一直是农业生产、农业面源污染防治、温室气体排放等领域关注的重点。生物炭对农田生态系统氮循环过程的影响作用机制已成为国内外学者关注的焦点,并在这 6 个方面已开展了大量研究。近年来,关于生物炭对土壤氮循环影响的研究发展迅速,发文量逐年增加,但由于涉及内容复杂、分类不清,目前尚无针对生物炭对土壤氮循环影响的发展态势的系统总结分析。基于科技文献事实的文献计量学能从多方面、多角度揭示学科研究现状与热点问题,评价研究机构科研实力,有助于科研工作者把握学科整体布局、发展方向和学科优势^[13]。虽然这一方法可能并未涵盖最新的文章,但只要科学合理的设置主题词,计量分析结果对后人了解前人研究成果、总结研究经验、开拓研究方向仍有非常重要的借鉴意义^[14]。

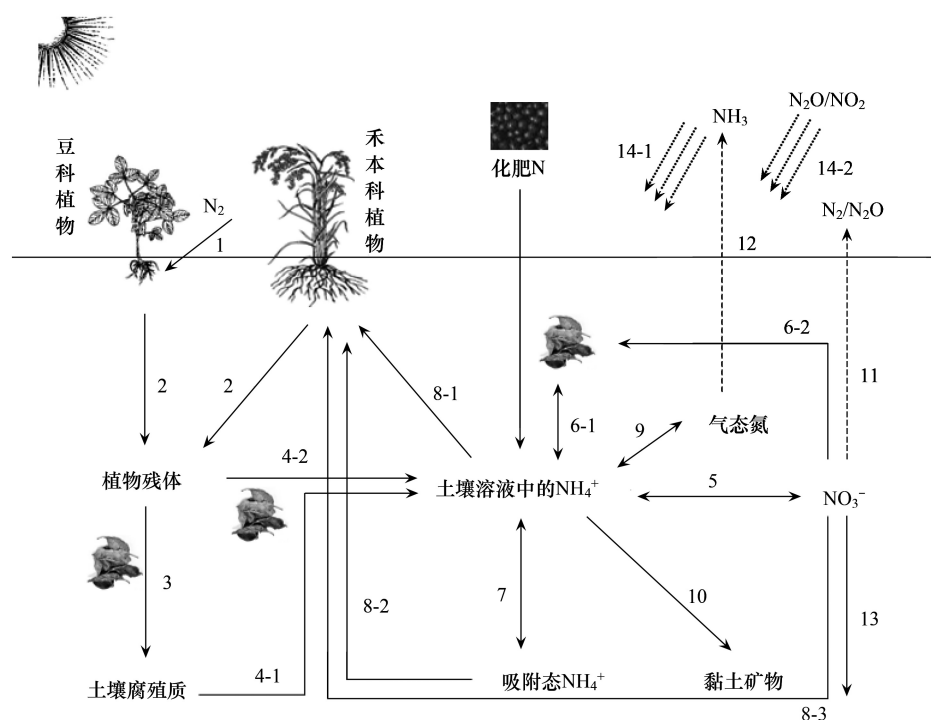
因此,本文基于 ISI Web of Science 数据库,采用文献计量学方法,针对“生物炭对土壤氮循环影响”及其分支技术进行文献检索、数据整理、分类以及主题分析,并对检索出的文献进行两个层面的分析:一是整体态势分析,主要是对该领域全部年数据进行轮廓性的年代、国家、机构和期刊分布分析;二是具体分支技术分析,详细介绍分支技术的研究发展现状及趋势。

1 整体态势分析

以 ISI Web of Science 数据库中全部期刊为检索对象,检索时间截止到 2014 年 6 月,检索关键词为“biochar/charcoal/blackchar/black carbon” and “nitrogen cycling/nitrogen-cycling”,共检索到 2468 篇论文。其中,期刊论文(Article)2188 篇、综述性论文(Review)93 篇,其它类论文 177 篇。对检索出的文献数据采用美国汤森路透公司文献分析工具 Thomson data analyzer(简称 TDA)和 Excel 2010 进行分析。

1.1 年代分布

从图 2 可以看出,20 世纪初就有关于生物炭对土壤氮循环影响的研究报道,发文量呈持续增长的发展态

图1 土壤氮循环示意图^[12]Fig.1 The diagram of soil nitrogen cycling^[12]

1: 生物固氮; 2: 有机氮归还; 3: 腐殖化; 4-1: 土壤腐殖质矿化; 4-2: 植物残体分解; 5: 自养硝化作用; 6-1: 铵态氮固持; 6-2: 硝态氮固持; 7: NH_4^+ 的吸附与解吸; 8-1: 溶液 NH_4^+ 的吸收; 8-2: 吸附态 NH_4^+ 的吸收; 8-3: 硝态氮的吸收; 9: 土壤中液/气相氨的平衡; 10: NH_4^+ 的固定; 11: 反硝化作用; 12: 氨挥发; 13: NO_3^- 的淋洗; 14-1: 氨沉降; 14-2: 大气硝酸盐沉降

势,但前期发展缓慢,年发文量均在10篇以下;进入20世纪90年代后,相关研究发文量增长迅速,年增长率平均在15%左右,2013年年发文量突破260篇。可见,随着全球气候变化加剧,粮食及生态环境安全更加严重,尤其是目前严峻的氮肥资源紧缺及水体富营养化的形势,越来越多的专家开始关注生物炭对土壤氮循环过程的影响作用^[15-17]。

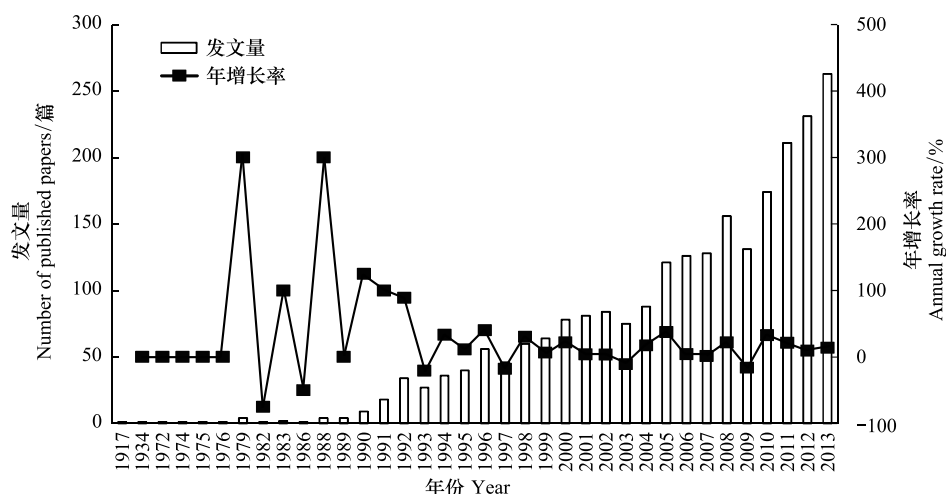


图2 生物炭对土壤氮循环的影响主题SCI论文年代分布

Fig.2 The time distribution of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

1.2 国家(或地区)分布

全球共有 100 多个国家/地区开展了生物炭对土壤氮循环影响的研究,其中前 20 位的国家排名见图 3。发文量名列前 10 位的国家分别是美国、中国、加拿大、英国、德国、日本、新西兰、荷兰、丹麦和印度,占发文总量的 85.2%。尤其,美国在该主题的研究中占有绝对优势,其发文量占全部论文的 19.6%;中国在该领域的发文量排名第 2,发文量占总量的 13.4%。

从研究区域上看,欧洲在生物炭对土壤氮循环影响的研究中占有明显的优势,整体实力雄厚,排名进入前 20 位的欧洲国家有英国、德国、荷兰、丹麦、法国、瑞典、意大利、比利时和奥地利,发文量占总量的 39.7%;北美洲次之,美国和加拿大的发文量占总量的 28.4%;东亚的中国和日本,发文量占总量的 21.2%。

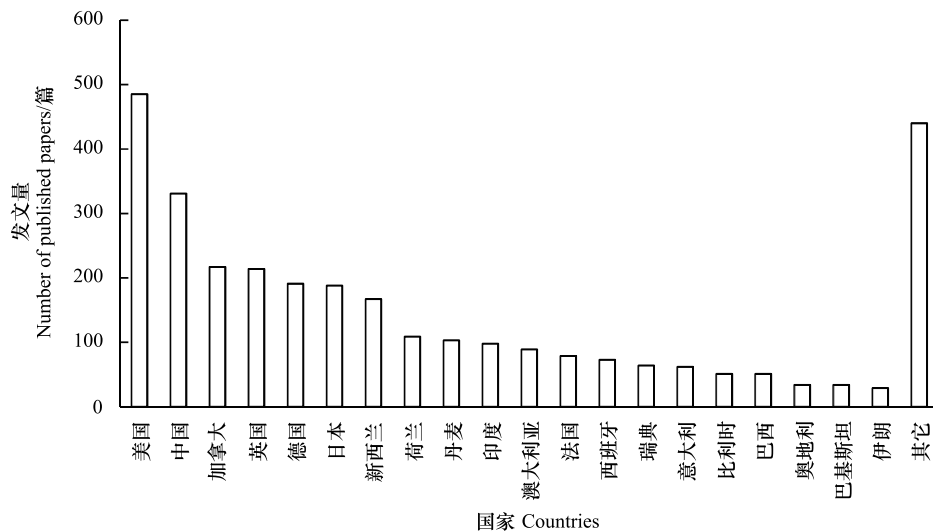


图 3 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文国家/地区分布

Fig.3 The country/region distribution of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

从图 4 中可以看出,发文量前 4 位国家中,美国最早在生物炭对土壤氮循环的影响方面开展相关研究,可追溯到 1917 年,其年发文量处于全球领先地位,并持续到 2010 年。进入 20 世纪 90 年代后,加拿大和英国相继进入该研究领域,年发文量呈波动上升的态势。在全球良好的科研环境条件下,虽然中国起步较晚,但起点较高、发展势头强劲,近年来,中国的年发文量已超过美国,成为全球第一的年发文大国。

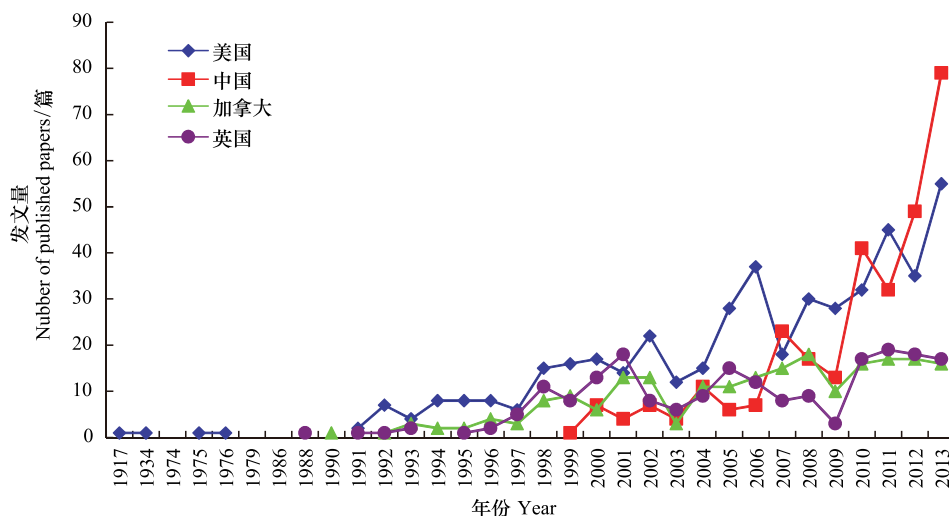


图 4 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文前 4 位国家年代分布

Fig.4 The time distribution of the former four countries of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

1.3 研究机构分布

全球有 1500 多家研究机构活跃在生物炭对土壤氮循环影响的研究领域。在前 20 位研究机构中(表 1), 中国和美国各 4 家,加拿大和新西兰各 3 家,丹麦、日本和英国各 2 家,荷兰、法国、瑞典和德国各有 1 家。排名前 5 位的研究机构依次是中国科学院、加拿大农业与农产食品部(Agriculture and Agri-Food Canada, AAFC)、美国农业部农业研究服务署(USDA,ARS)、新西兰林肯大学(Lincoln University,LC)和荷兰瓦赫宁根大学及研究中心(Wageningen University and Research Center,UWRC)。其中,中国科学院的发文量最多,达 158 篇,远远领先于其他研究机构,为该研究领域的第一研究梯队;加拿大农业与农产食品部与美国农业部农业研究服务署的发文量相当,分别为 119 篇和 118 篇,形成了该研究领域的第二研究梯队。进入排名前 20 位的中国研究机构还有南京农业大学、中国农业科学院和中国农业大学,分别排在第 10、13 位和第 15 位。另外,浙江大学以 17 篇的发文量排在全球第 35 位。

表 1 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文研究机构分布

Table 1 The research institutions distribution of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling					
国际排名 International rankings	国内排名 Rankings in China	研究机构名称 Research institution names	发文量/篇 Number of published papers/piece	国家/地区 Country/ region	占总发文量的比例/% The proportion of the total published papers
1	1	中国科学院	158	中国	6.4
2		加拿大农业与农产食品部	119	加拿大	4.8
3		美国农业部农业研究服务署	118	美国	4.8
4		林肯大学	76	新西兰	3.1
5		瓦赫宁根大学及研究中心	53	荷兰	2.1
6		奥胡斯大学	44	丹麦	1.8
7		法国农业科学研究院	43	法国	1.7
8		瑞典农业科技大学	41	瑞典	1.7
9		国家农业环境研究所	34	日本	1.4
10	2	南京农业大学	33	中国	1.3
10		加州大学戴维斯分校	33	美国	1.3
12		土地环境保护研究所	31	新西兰	1.3
13	3	中国农业科学院	30	中国	1.2
14		新西兰 AgResearch 研究所	29	新西兰	1.2
15	4	中国农业大学	28	中国	1.1
16		丹麦农业科技研究所	25	丹麦	1.0
16		阿尔伯塔大学	25	加拿大	1.0
18		俄亥俄州立大学	24	美国	1.0
18		洛桑实验站	24	英国	1.0
18		基辅大学	24	加拿大	1.0
18		霍恩海姆大学	24	德国	1.0
19		康奈尔大学	23	美国	0.9
19		草地植被与环境研究所	23	英国	0.9
20	5	北海道大学	22	日本	0.9
35		浙江大学	17	中国	0.7

分析国际前 5 位研究机构历年发文情况(图 5),20 世纪 90 年代初期各研究机构在生物炭对土壤氮循环影响方面的研究均处于起步阶段;90 年代中后期,各机构的发文量开始增长。由图 5 可以看出,加拿大农业与农产食品部(AAFC)最早开展相关研究,其次为美国农业部农业研究服务署(ARS),中国科学院(CAS)在 90 年代末期开展了相关研究,近年来发展迅速。

国内排名相对靠前的前 5 位研究机构分别是中国科学院、南京农业大学、中国农业科学院、中国农业大学

和浙江大学。由图 6 的机构-年发文量情况可以看出,中国科学院和中国农业科学院最早开展相关研究。另外,中国科学院和南京农业大学的年发文量呈现连续性的特征,而其余研究机构的相关研究时断时续。

1.4 期刊分布

该主题发表的论文涉及期刊近 500 种,发文量前 20 位期刊情况见表 2。其中,发文量最多的前 5 种期刊分别是:SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY (127 篇)、AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT (124 篇)、NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS (105 篇)、JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY (99 篇)和 PLANT AND SOIL (88 篇)。该 5 种期刊的平均影响因子为 2.985 (2015 年),其中,SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY 和 AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT 两种期刊 2015 年影响因子均在 3.2 以上。

综上所述,自 20 世纪 90 年代后,国际上越来越多的专家开始关注生物炭对土壤氮素迁移转化过程的影响作用,有 1500 多家研究机构活跃在生物炭对土壤氮循环影响作用研究领域。美国、加拿大、英国等欧美国家在该领域的研究中占有明显的优势,而自 2010 年以来,中国已成为该领域全球第一的年发文大国。

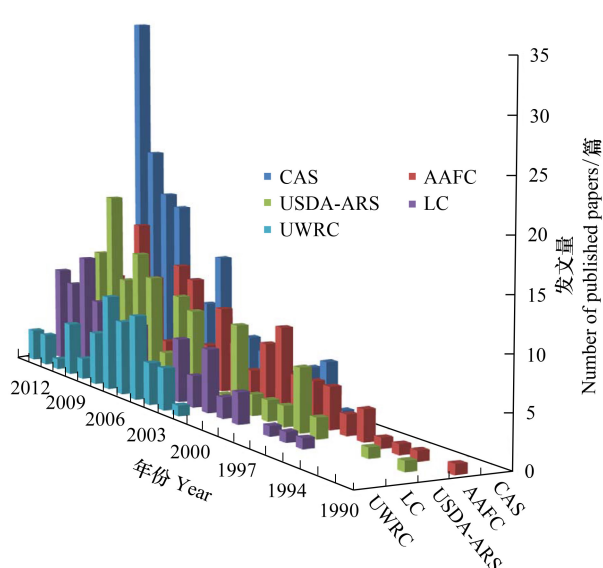


图 5 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文前 5 位机构年代分布

Fig.5 The research institutions distribution of the former five countries of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

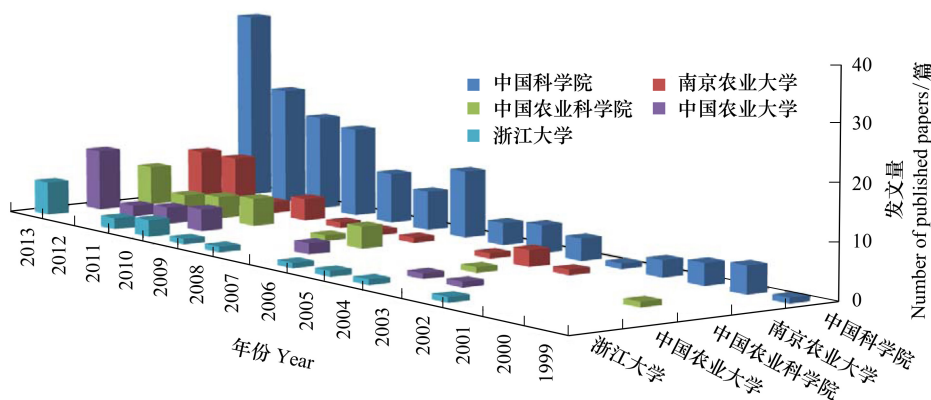


图 6 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文前 5 位中国机构-年代分布

Fig.6 The research institutions distribution of the former five countries of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling in China

2 分支技术分析

生物炭对土壤氮循环的影响体现在对土壤 N_2O 排放、氮肥利用率、硝化速率、 NH_4^+/NH_3 的吸附、 NO_3^- 的吸附以及微生物氮素固持能力的影响等 6 类分支技术方面,下面从发文量情况和研究进展 2 个角度进行详细介绍。

2.1 论文发表情况

图 7 可以看出,生物炭对土壤 N_2O 排放的影响方面发文量最多,为 1237 篇,占总发文量的 50.1%;其次是

生物炭对土壤氮肥利用率的影响主题,发文量为 582 篇,占总发文量的 23.6%;生物炭对土壤硝化速率的影响主题的发文量为 280 篇,排在第 3 位;其余 3 类分支技术的发文量相对较少,在 150 篇以下。

表 2 生物炭对土壤氮循环的影响主题 SCI 论文期刊分布

Table 2 The journal distribution of SCI papers about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling			
排序 Number	期刊名称 Name of journals	发文量/篇 Number of published papers/piece	占总发文量的比例 The proportion of the total published papers
1	SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY	127	5.1%
2	AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT	124	5.0%
3	NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS	105	4.3%
4	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY	99	4.0%
5	PLANT AND SOIL	88	3.6%
6	BIOLOGY AND FERTILITY OF SOILS	86	3.5%
7	SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL	61	2.5%
8	COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS	58	2.4%
9	SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION	50	2.0%
10	CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE	46	1.9%
11	BIORESOURCE TECHNOLOGY	44	1.8%
12	SOIL USE AND MANAGEMENT	41	1.7%
13	AGRONOMY JOURNAL	37	1.5%
14	ATMOSPHERIC ENVIRONMENT	35	1.4%
15	APPLIED SOIL ECOLOGY	27	1.1%
15	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	27	1.1%
17	AUSTRALIAN JOURNAL OF SOIL RESEARCH	25	1.0%
18	FIELD CROPS RESEARCH	23	0.9%
19	GEODERMA	20	0.8%
20	CHEMOSPHERE	19	0.8%
20	SOIL & TILLAGE RESEARCH	19	0.8%

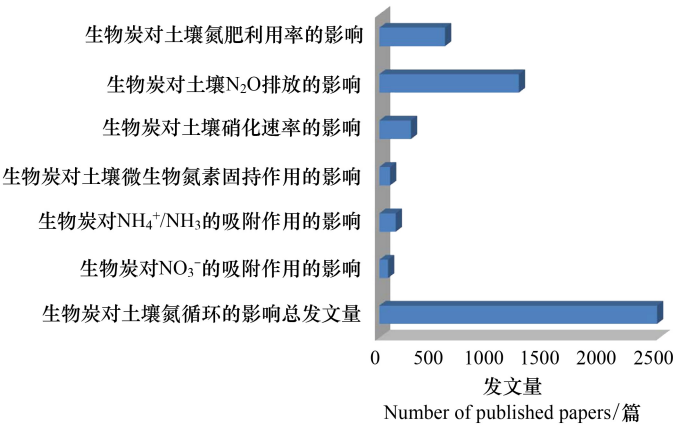


图 7 生物炭对土壤氮循环的影响主题分支技术 SCI 论文量

Fig.7 The number of SCI papers of the branch technology about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

生物炭对土壤氮循环影响的 6 类主题分支技术的发文量随时间的变化情况如图 8 所示。其中,最早出现生物炭对 NH₄⁺/NH₃的吸附作用相关研究,可追溯到 1917 年;生物炭对土壤 N₂O 排放、土壤微生物氮素固持作用以及 NO₃⁻ 的吸附作用的影响主题论文最早纷纷发表于 20 世纪 70 年代,其余 2 类主题的研究论文在随后的 80 年代见诸报道。总的来说,各分支技术主题的年发文量均呈持续上升的态势。从历年的发文量看,最活跃

的为生物炭对土壤 N₂O 排放的影响主题,尤其在 2009 年以来的发展尤为快速。

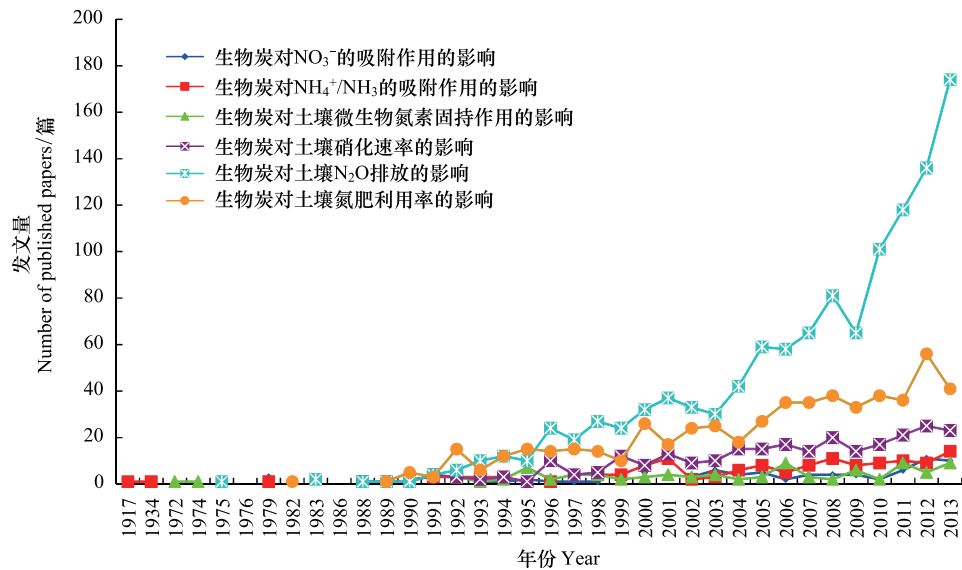


图 8 生物炭对土壤氮循环的影响主题分支技术 SCI 论文年代分布

Fig.8 The time distribution of SCI papers of the branch technology about the effect of biochar on the soil nitrogen cycling

2.2 研究进展

2.2.1 生物炭对土壤 N₂O 排放的影响

N₂O 作为产生温室效应的主要组成气体之一,可导致臭氧层破坏。目前,生物炭对土壤 N₂O 排放影响的研究结果争议性很大,有研究表明,添加生物炭能够减少土壤 N₂O 的排放,而也有研究认为,生物炭对土壤 N₂O 排放无影响,甚至促进 N₂O 排放(表 3)。

表 3 生物炭对土壤 N₂O 排放的影响

Table 3 Effects of biochar on soil N₂O emission

土壤类型 Soil type	生物炭对土壤 N ₂ O 排放的影响 Biochar's effects	参考文献 Reference
水稻土	61 年后,添加生物炭土壤 N ₂ O 排放总量下降 21%—51%	[18]
大豆、牧草土壤	添加生物炭大豆、牧草土壤 N ₂ O 排放量分别减少 50% 和 80%	[19]
14 种农田土壤	N ₂ O 排放减少 10%—90%	[20]
草场土壤	在添加牛尿的条件下,初始 30d,生物炭促进 N ₂ O 挥发;53d, N ₂ O 总累计排放量与对照无显著差异	[16]
砂质粘壤土	2a 田间试验表明, N ₂ O 年累计排放量显著高于对照	[21]

生物炭减少 N₂O 排放的作用机制一般认为是生物炭增加了土壤 pH,促使反硝化过程中 N₂O:N₂向着有利于产生 N₂的方向变化^[20],也有研究认为是增加了土壤通气性和土壤碳的稳定性^[18,22]。Yanai 等^[22]认为,生物炭对 N₂O 的排放受控于土壤的初始含水孔隙率,含水孔隙率较低(73%)的条件下,生物炭能够增强土壤的通气性,降低土壤中的反硝化反应,进而减少 N₂O 的排放;当含水孔隙率增加到 83%,生物炭无法通过促进土壤通气性降低土壤反硝化速率,反而会促进 N₂O 的产生。总之,生物炭能够显著影响土壤 N₂O 的排放,而这种影响与生物炭的类型、老化过程以及土壤类型及其含水孔隙率等密切相关^[15]。

2.2.2 生物炭对氮肥利用率的影响

随着人们对生物炭认识和研究的不断深入,生物炭在农业生产上的应用也逐渐受到重视(表 4)。生物炭提高氮肥利用率^[23-24],促进作物增产的作用已得到大量试验证明^[25, 17]。然而也有研究表明添加生物炭对作物氮肥利用率没有提高,甚至发生抑制作用^[28, 31-32]。

表 4 生物炭对氮肥利用率的影响

Table 4 Effects of biochar on soil nitrogen use efficiency

生物炭类型 Biochar type	试验类型 Experiment type	生物炭对土壤硝化速率的影响 Biochar's effects	参考文献 References
木炭	田间试验-高粱(<i>Sorghum</i> sp.)	提高氮肥利用率 60.8%	[26]
畜禽粪便生物炭	盆栽试验-萝卜(<i>Raphanus sativa</i> L.)	提高氮肥利用率,产量增加 42%—96%	[27]
纸厂废弃物生物炭 (pH9.4 或 8.2)	盆栽试验- Ferrosol 土壤(pH4.2) 和 Calcarosol 土壤(pH7.7)	提高了 Ferrosol 土壤中的氮肥利用率;对 Calcarosol 土壤无显著影响	[28]
生物炭	盆栽试验-玉米	提高氮肥利用率,玉米生物量显著高于对照	[29]
生物炭	温室盆栽试验-温带淋溶土-玉米	0.2%生物炭提高玉米吸氮量 15%;7%生物 炭降低玉米吸氮量 16%	[30]
生物炭	4a 田间试验-哥伦比亚热带氧化土-玉米	第 1 年玉米产量没有显著变化,随后 3a 玉 米产量显著增加 28%—140%	[31]
花生壳生物炭	21 田间试验- Ultisols 土-玉米	降低氮肥利用率,玉米产量降低	[32]

生物炭提高作物氮肥利用率的作用机理众说纷纭,主要包括生物炭改善了土壤结构,提高了土壤 pH 值、阳离子交换能力^[26]和可利用磷含量^[27,33],以及减缓了土壤的铝毒作用等^[29-30]。也有研究表明,氮肥在土壤中会发生微生物的固持作用或者被生物炭表面的有机物质吸附^[26,33],反而降低了作物的吸氮量。总体而言,尽管生物炭对不同土壤类型、不同作物的氮肥利用率存在差异,但其对土壤肥力的长效作用已经得到普遍认可。

2.2.3 生物炭对土壤硝化速率的影响

生物炭对土壤硝化速率的影响作用结论不一,有研究认为生物炭能够促进土壤硝化速率,而也有研究认为,生物炭会抑制土壤硝化速率,且这种抑制作用受作用时间以及土壤类型等的影响很大(表 5)。

表 5 生物炭对土壤硝化速率的影响

Table 5 Effects of biochar on soil nitrification rates

生物炭类型 Biochar type	试验类型 Experiment type	生物炭对土壤硝化速率的影响 Biochar's effects	参考文献 References
木炭	田间试验	促进森林土壤硝化速率	[34-35]
棉花秆生物炭	室内培养试验	提高沿海碱性土壤硝化速率	[36]
玉米秸秆生物炭	田间和室内培养试验	提高农田土壤硝化速率(10%—69%)	[37]
生物炭	室内培养试验	前 30d 抑制土壤硝化速率;50d 后抑制作用 逐渐减弱	[16]
木炭	室内培养试验	促进森林土壤硝化速率;对草地土壤硝化速 率无显著影响	[38]
小麦秸秆生物炭	室内培养试验	对农田土壤硝化速率影响不显著	[39]

关于生物炭提高土壤硝化速率的作用机制解释很多,有研究认为,生物炭能够吸附土壤中大量溶解态苯酚和萜烯等抑制硝化反应的化合物^[34,40];也有研究认为,生物炭能够抑制土壤中影响硝化细菌群落结构多样性的因子^[38],促进土壤中氨氧化细菌的丰富度和活性等^[36],进而提高土壤硝化速率。生物炭中含有的对微生物具有毒性作用的化合物(如多环芳烃类)是抑制土壤硝化速率的主要作用机制,但随着生物炭老化过程的延长,能够减弱这种抑制作用^[16]。由此可见,生物炭可通过改变土壤微生物活性以及生物炭自身老化等途径影响土壤硝化速率,进而影响土壤供氮水平。

2.2.4 生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 吸附的影响

生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 有很强的吸附作用,作用强度主要受制备原料及生物炭制备过程中热解温度的影响(表 6)。

表 6 生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 吸附的影响Table 6 Effects of biochar on the adsorption of $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$

生物炭类型 Biochar type	炭化温度/ $^{\circ}\text{C}$ Experiment type	生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 吸附的影响 Biochar's effects	参考文献 References
竹炭	600	对浓度为 78 mg/L 的 NH_4^+ 溶液的吸附能力为 0.852 mg/g, 70d 可减少 NH_4^+-N 损失 15.2%	[41]
蔗渣、花生壳、竹子、巴西加州州桂生物炭	300/600	对浓度为 10 mL/L 的 NH_4^+ 溶液吸附能力为 0.05—0.79 mg/g	[42]
小麦秸秆、玉米秸秆、花生壳生物炭	400—700	对浓度为 100 mg/L 的 NH_4^+ 溶液的吸附能力分别为 0.9—1.3、2.4—3.6、0.8—2.3 mg/g	[43]
生物炭	—	1%、3%和 5%生物炭能够分别减少土柱中 NH_4^+-N 淋失量 22%、39%和 47%	[44]
桉树木屑生物炭	—	1%生物炭能够减少土柱中 NH_4^+-N 淋溶量 15.8%	[45]
日本柳杉(<i>Cryptomeria Japonica</i>)生物炭	500	8 小时内对浓度为 100 mg/L 的 NH_3 去除率可达 100%; 24 小时对浓度为 150 mg/L 的 NH_3 去除率达 80%以上	[46]
棕榈油生物炭	500	对浓度为 7 mg/L 的 NH_3 吸附量为 4.0 mg/g	[47]

生物炭对 NH_4^+ 的吸附能力主要与其制备温度和溶液 pH 密切相关, 较低的制备温度和较高的 pH 值能够提高生物炭吸附 NH_4^+ 的能力^[43,48]。这主要是由于热解温度和 pH 值会影响生物炭的阳离子交换能力 (CEC), 而生物炭的 CEC 直接决定了其对 NH_4^+ 的吸附能力^[43,49-51]。生物炭的 CEC 主要来自生物炭的氧化作用和表面有机质的吸附作用。Cheng 等^[49]在 30 $^{\circ}\text{C}$ 和 70 $^{\circ}\text{C}$ 条件下开展了生物炭的生物和非生物短期培养试验 (4 个月), 结果表明 70 $^{\circ}\text{C}$ 更有利于 CEC 的增加 (53%—538%), 其主要原因来自于羧基官能团的形成。酸性官能团含量是决定生物炭吸附 NH_3 的主要因素^[47,52-53]。Asada 等^[52-53]研究发现较低热解温度制备的生物炭具有更强的 NH_3 吸附能力, 并通过电子自旋共振光谱实验证实, 较高的热解温度会降低生物炭中酸性官能团的数量, 进而降低 NH_3 吸附能力。稀硫酸处理和臭氧处理能够通过去除酸性官能团上负载的非 NH_3 离子, 为 NH_3 提供更多的吸附位点, 而大大增加生物炭对 NH_3 的吸附能力^[47,52]。总之, 在大多数研究中, 生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 的影响均表现为正效应, 虽然吸附能力受生物炭制备原料、热解温度、制备工艺以及土壤类型的影响很大, 但大量研究结果已经证明, 生物炭对 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 的固定作用已是不争的事实, 在农业实践过程中, 只要应用适当, 其正向效应是完全可以利用的。

2.2.5 生物炭对 NO_3^- 吸附的影响

生物炭对溶液中 NO_3^- 的吸附与热解温度密切相关, Clough 等^[16]在总结了各类温度生物炭吸附 NO_3^- 能力的基础上, 提出 600 $^{\circ}\text{C}$ 是生物炭发生 NO_3^- 吸附的基本热解温度, 而当热解温度高于 700 $^{\circ}\text{C}$ 时, 生物炭才具有显著的 NO_3^- 吸附能力。而生物炭对土壤中 NO_3^- 的影响研究表明, 生物炭能够有效减少土壤中 NO_3^- 的流失, 提高土壤对氮素的固持能力和作物的氮肥利用率^[55-57] (表 7)。

生物炭吸附 NO_3^- 能力受热解温度影响显著的主要原因是由于随着热解温度的升高, 生物炭中官能团发生转变, 由基本官能团转化为酸性官能团, 进而影响生物炭表面电荷, 为 NO_3^- 的吸附提供丰富的阴离子交换位点^[15,62], 特别是一些未被氧化或者老化的生物炭受热解温度的影响较大^[63], 而与生物炭的比表面积和孔容没有显著相关性^[58]。也有研究认为, 随着生物炭 pH (pH 3—7) 的降低, 生物炭表面正电荷增加能够促进 NO_3^- 的吸附^[64]。Ohe 等^[60]开展的竹炭对 NO_3^- 的吸附试验也证明, pH 2.4 的平衡酸度下生物炭对 NO_3^- 达到最佳吸附效果。

2.2.6 生物炭对土壤微生物氮素固持作用的影响

目前生物炭对土壤微生物氮素固持作用的影响结论争议性较大。生物炭促进土壤微生物氮素固持作用的机制主要有较低热解温度制备的生物炭中含有一定的易降解碳组分, 这部分易降解碳施入农田后易被土

壤微生物所利用,进而在短期内实现土壤氮的固定^[65-67]。也有研究认为生物炭能够通过增加细菌生物量促进氮的固定^[68]。而 Zackrisson 等^[69]将其归因于热解产生的生物炭具有较大孔结构和表面特征,能够吸附大量多酚化合物,土壤微生物将多酚化合物作为碳源,增加了对氮的需求,从而促进氮的固定。酸性哥伦比亚大草原氧化土施用木炭(20 t/hm²)的研究表明,木炭可显著增加土壤中的 NH₄⁺、NO₃⁻ 含量以及土体中的氮素淋失,主要是由于生物炭含有的易降解碳很少,单独添加生物炭对土壤微生物活性的影响较小,没有显著的微生物固氮作用^[70-71],从而造成土壤氮素损失^[72]。

表 7 生物炭对 NO₃⁻ 吸附的影响
Table 7 Effects of biochar on the adsorption of NO₃⁻

生物炭类型 Biochar type	炭化温度/℃ Pyrolysis temperature	生物炭对溶液中 NO ₃ ⁻ 的吸附 Biochar's effects	参考文献 References
甘蔗渣生物炭	800	对 20 mg/L NO ₃ ⁻ 溶液中吸附能力为 0.44 mg/g	[58]
	400—600, >700	不具备吸附 NO ₃ ⁻ 的能力	
竹炭	900	对 10 mg/L NO ₃ ⁻ 溶液中吸附能力为 89.46 mg/g	[59]
竹炭	—	对 NO ₃ ⁻ 的最佳吸附能力为 1.95 mg/g	[60]
蔗渣、花生壳、竹子、巴西加州州桂生物炭	600	对 34.4 mg/L NO ₃ ⁻ 溶液中吸附能力为 0.02—0.64 mg/g	[42]
桉树生物炭	600	对 2.5—5 mg/L NO ₃ ⁻ 溶液中吸附能力为 0.02—0.04 mg/g; 对 50 mg/L NO ₃ ⁻ 溶液中吸附能力为 0.19 mg/g	[57]
玉米秸秆生物炭	500	1%、2% 和 4% 生物炭能够分别减少土柱中 NO ₃ ⁻ -N 累计淋失量 28%、49%、58%	[61]
花生壳、巴西加州州桂生物炭	600	2% 生物炭对土柱中 NO ₃ ⁻ (34.4 mg/L) 的淋溶削减量达 34%	[42]
桉树生物炭	600	21d, 1% 生物炭对砂质农田土 NO ₃ ⁻ 的累计淋溶削减量达 25%	[57]

综上所述,生物炭对土壤氮循环的影响,既决定于生物炭自身的性质,也决定于特定土壤的理化性质和作物生物学属性等诸多方面,复杂的交互作用及其过程也会使试验结果不尽一致。因此,生物炭应用于农业生产,应该因地、因作物、因具体条件而异。

3 展望

随着科学界对农业面源污染领域的重视,生物炭在土壤氮循环过程中的作用机制受到越来越多的关注,然而,目前已有的相互矛盾的研究结果,充分表明了目前关于生物炭对土壤氮循环影响了解的知识是极为有限的,还存在许多的不确定性和未解决问题,已有的科学结论和问题需要更进一步的研究来验证和丰富,针对“生物炭对土壤氮循环影响”6 个分支主题,作者做了以下几点展望:

- (1) 生物炭具有固碳、减缓全球气候变化和降低温室气体排放等作用,将生物炭对碳氮循环的影响有机结合起来,将为农业发展及环境保护的和谐发展提供可借鉴意义。
- (2) 已有的短、中期试验结果表明施用生物炭能够提高作物肥料利用率,但目前仍缺少长期定位试验的结论,需要大量的长期监测试验。
- (3) 不同的研究者关于“生物炭对土壤硝化速率的影响作用研究”得到的结论不同,缺少关键作用机制的研究。如,生物炭对土壤氮相关功能微生物的主要作用机制是什么,生物炭如何影响其硝化和反硝化反应等关键问题仍没有答案。
- (4) 进一步在大气-土壤-植物生态系统中开展土壤氮素的定性和定量研究,为明确生物炭对土壤微生物氮素固持作用机制提供有力手段。

参考文献 (References):

[1] Sombroek W. Amazon soils: A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region [R]. Wageningen: Center for Agricultural Publications
<http://www.ecologica.cn>

and Documentation, 1966.

- [2] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: An introduction [M]. In Lehmann J and Joseph S, eds. Biochar for environmental management, science and technology, London: Earthscan Publications Ltd., 2009: 1-12.
- [3] Xie T, Reddy K R, Wang C, Yargicoglu E, Spokas K. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45: 939-969.
- [4] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad J O, Thies J, Luizao F J, Petersen J, Neves E G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [5] Zhang A, Bian R, Hussain Q, Li L, Pan G, Zheng J, Zhang X, Zheng J. Change in net global warming potential of a rice-wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 173: 37-45.
- [6] Zhai L, Cai J Z, Liu J, Wang H, Ren T, Gai X, Xi B, Liu H. Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(1): 113-122.
- [7] Van Zwieten L, Kimber S W L, Morris S G, Singh B P, Grace P R, Scheer C, Rust J, Downie A E, Cowie A L. Pyrolysing poultry litter reduces N_2O and CO_2 fluxes. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 279-287.
- [8] Hu Y, Wu F, Zeng D, Chang S. Wheat straw and its biochar had contrasting effects on soil C and N cycling two growing seasons after addition to a Black Chernozemic soil planted to barley. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 1291-1299.
- [9] Prommer J, Wanek W, Hofhansl F, Trojan D, Offre P, Urlich T, Schleper C, Sassmann S, Kitzler B, Soja G. Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. *PLoS ONE*, 2014, 9(1).
- [10] Cayuela M L, Van Zwieten L, Singh B P, Jeffery S, Roig A, Sanchez-Monedero M A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 191: 5-16.
- [11] Woolf D, Amonette J E, Stree-Perrott F A, Lehmann J, Joseph S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 2010, 1: 56.
- [12] 吕贻忠, 李保国. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [13] Canas-Guerrero I, Mazarron F R, Pou-Merina A, Calleja-Perucho C, Diaz-Rubio G. Bibliometric analysis of research activity in the "Agronomy" category from the Web of Science, 1997-2011. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 19-28.
- [14] Sun J S, Wang M H, Ho Y S. A historical review and bibliometric analysis of research on estuary pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(1): 13-21.
- [15] Singh B P, Hatton B J, Singh B, Cowie A L, Kathuria A. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224-1235.
- [16] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, Condon L M, O'Callaghan M, Sherlock R R, Wells N S. Unweathered biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine-urine-amended pasture soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 852-860.
- [17] Dong D, Feng Q, McGrouther K, Yang M, Wang H, Wu W. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15: 153-162.
- [18] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, Li L, Hussain Q, Zhang X, Zheng J, Crowley D. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [19] Rondon M, Ramirez J A, Lehmann J. Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere. In *Proc. of the 3rd Symp. on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration*. USDA, Baltimore, MA, 2005: 208.
- [20] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, Hanley K, Enders A, Lehmann J. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N_2O emissions? *Scientific Reports*, 2013, 3(1732): 1-6.
- [21] Verhoeven E, Six J. Biochar does not mitigate field-scale N_2O emissions in a Northern California vineyard: an assessment across two years. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014.
- [22] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181-188.
- [23] Ma L, Hou Z, Lv N, Ye J, Su S, Liang Y. Effects of biochar application on wheat growth and nitrogen balance. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49: 589-594.
- [24] Jones D L, Rousk J, Edwards-Jones G, DeLuca T H, Murphy D V. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 113-124.
- [25] Clough T J, Condon L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 1218-1223.
- [26] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, Lehmann J, Blum W E H, Zech W. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2008, 171(6): 893-899.

- [27] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 2008, 46(5): 437-444.
- [28] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan K Y, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 235-246.
- [29] Zhu Q, Peng X, Huang T, Xie Z, Holden N M. Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use efficiency in acidic red soils. *Pedosphere*, 2014, 24, 699-708.
- [30] Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman A R, Lehmann J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48: 271-284.
- [31] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S J, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [32] Gaskin J W, Speir R A, Harris K, Das K C, Lee R D, Morris L A, Fisher D S. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, 2010, 102: 623-633.
- [33] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, Downie A, Joseph S. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 2007, 45(8): 629-634.
- [34] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments of soil alters nitrification rates in Scots pine forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2067-2073.
- [35] Ball P N, MacKenzie M D, DeLuca T H, Holben W E. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1243-1253.
- [36] Song Y, Zhang X, Ma B, Chang S, Gong J. Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 321-332.
- [37] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, Staelens J, Ruyschaert G, Boeckx P. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 55:20-27.
- [38] Deluca T H, Mackenzie M D, Gundale M J, Holben W E. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 448-453.
- [39] Cheng Y, Cai Z, Chang S X, Wang J, Zhang J. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48: 941-946.
- [40] Paavolainen L, Kitunen V, Smolander A. Inhibition of nitrification in forest soil by monoterpenes. *Plant and Soil*, 1998, 205(2): 147-157.
- [41] Ding Y, Liu Y, Wu W, Shi D, Yang M, Zhong Z. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water air and soil pollution*, 2010, 213(1/4): 47-55.
- [42] Yao Y, Gao B, Zhang M, Inyang M, Zimmerman A R. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 2012, 89(11): 1467-1471.
- [43] Gai X, Wang H, Liu J, Zhai L, Liu S, Ren T, Liu H. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. 2014. *PLoS ONE*, 9(12).
- [44] 刘玮晶, 刘烨, 高晓荔, 杨旻, 王英惠, 代静玉. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 962-968.
- [45] 邢英, 李心清, 王兵. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2483-2488.
- [46] Iyobe T, Asada T, Kawata K, Oikawa K. Comparison of removal efficiencies for ammonia and amine gases between woody charcoal and activated carbon. *Journal of Health Science*, 2004, 50(2): 148-153.
- [47] Kastner J R, Miller J, Das K C. Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1420-1427.
- [48] Hollister C C, Bisogni J J, Lehmann J. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from corn stover (*Zea mays* L.) and oak wood (*Quercus* spp.). *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1): 137-144.
- [49] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, Burton S D, Engelhard M H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477-1488.
- [50] Silber A, Levkovich I, Graber E R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstrow biochar: agronomic implications. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9318-9323.
- [51] Nguyen B T, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(8): 846-853.
- [52] Asada T, Ishihara S, Yamane S, Toba A, Yamada A, Oikawa K. Science of bamboo charcoal: Study of carbonizing temperature of bamboo charcoal and removal capability of harmful gases. *Journal of Health Science*, 2002, 48(6): 473-479.

- [53] Asada T, Ohkubo T, Kawata K, Oikawa K. Ammonia adsorption on bamboo charcoal with acid treatment. *Journal of Health Science*, 2006, 52 (5): 585-589.
- [54] Clough T J, Condon L M, Kammann C, Müller C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275-293.
- [55] Güereña D, Lehmann J, Hanley K, Enders A, Hyland C, Riha S. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant and Soil*, 2013, 365: 239-254.
- [56] Zheng H, Wang Z, Deng X, Herbert S, Xing B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*, 2013, 206: 32-39.
- [57] Dempster D N, Jones D L, Murphy D V. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. *Soil Research*, 2012, 50(3): 216-221.
- [58] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, Shinogi Y. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [59] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, Nishihara K, Nakanishi T. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [60] Ohe K, Nagae Y, Nakamura S, Baba Y. Removal of nitrate anion by carbonaceous materials prepared by bamboo and coconut shell. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2003, 36(4): 511-515.
- [61] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 王洪媛. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究. *农业环境科学学报*, 2015, (34)2: 310-318.
- [62] Al-Wabel M I, Al-Omran A, El-Naggar A H, Nadeem M, Usman A R A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*, 2013, 131: 374-379.
- [63] Eykelbosh A J, Johnson M S, Couto E G. Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 9-16.
- [64] Cheng C H, Lehmann J. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere*, 2009, 75(8): 1021-1027.
- [65] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformations. In Lehmann J and Joseph S, eds. *Biochar for environmental management, science and technology*. London: Earthscan Publications Ltd., 2009: 251-270.
- [66] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2345-2347.
- [67] Bruun E W, Ambus P, Egsgaard H, Hauggaard-Nielsen H. Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 73-79.
- [68] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, Bending G. Impact of biochar on mineralization of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50: 695-702.
- [69] Zackrisson O, Nilsson M C, Wardle D A. Key ecological function of charcoal from wildfire in the boreal forest. *Oikos*, 1996, 77: 10-19.
- [70] Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, Bogomolova I, Xu X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ^{14}C labelling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(4): 210-219.
- [71] Bruun S, Jensen E S, Jensen L S. Microbial mineralization and assimilation of black carbon: Dependency on degree of thermal alteration. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(7): 839-845.
- [72] Major J, Rondon M, Molina D, Riha S, Lehmann J. Nutrient leaching in a Colombian savanna Oxisol amended with biochar. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41: 1076-1086.