

生物炭和秸秆还田

对华北农田土壤主要氮循环过程的影响

◎ 刘杏认 张晴雯 著

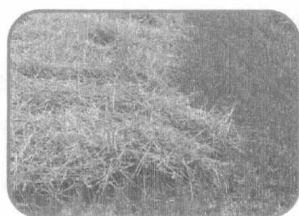


中国农业科学技术出版社

生物炭和秸秆还田

对华北农田土壤主要氮循环过程的影响

◎ 刘杏认 张晴雯 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

生物炭和秸秆还田对华北农田土壤主要氮循环过程的影响 / 刘杏认, 张晴雯著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-5116-4052-9

I. ①生… II. ①刘… ②张… III. ①活性炭—影响—耕作土壤—氮循环—研究 ②秸秆还田—影响—耕作土壤—氮循环—研究 IV. ①S155.4 ②X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 027180 号

责任编辑 崔改泵 李 华

责任校对 贾海霞

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街12号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106650

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京建宏印刷有限公司

开 本 710mm × 1 000mm 1/16

印 张 7.75

字 数 119千字

版 次 2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷

定 价 68.00元

———— 版权所有 · 翻印必究 ————

前言

氮素是作物生长必需的大量营养元素，也是农业可持续发展的根本要素。施用氮肥是提高作物产量的重要措施，但长期以来人们为追求高产而大量施用氮肥。我国氮肥利用率较低，目前仅为30%~35%，损失率约为45%。过量施用氮肥不仅使肥料利用率降低，同时还导致了一系列的环境问题，例如农田生态系统的温室气体排放持续增加是加剧全球气候变化的一个重要原因。 N_2O 是一种重要的温室气体，其增温效应为 CO_2 的296~310倍，对温室效应的贡献率约占5%。据最新估计，2010年全球农业系统排放的 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 为4.1~4.4Tg，我国农田生态系统平均每年向大气排放 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 约为0.36Tg，约占人为源排放量的60%，约占全球农业总排放量的11%。中国作为一个农业大国，其对全球 N_2O 排放的影响，已经成为全球变化研究的焦点之一。因此，在这种背景下，寻找一种减缓 N_2O 排放的有效措施是解决该问题的关键。如何有效提高氮素利用率、减缓农田土壤温室气体排放已成为目前研究的热点问题，具有重要的科学意义和现实意义。近年来，施用生物炭和秸秆还田成为提高农田土壤氮素利用率、减少温室气体排放的主要方式，然而秸秆进入土壤腐解时会排放大量温室气体，因而将秸秆制成生物炭加以利用已逐渐成为重要的农艺措施。华北平原是我国重要的粮食主产区之一，该区的粮食生产对国家的

粮食安全起着非常重要的作用。因此,在该地区系统开展生物炭和秸秆对农田土壤氮循环的影响,对国家粮食安全、缓解气候变化、提高氮素的利用率以及秸秆的资源化利用等均具有重要的科学意义和现实意义。

本书系统介绍了施用生物炭和秸秆还田对我国华北农田冬小麦—夏玉米轮作期土壤主要氮循环过程的影响。该研究以我国华北典型农田定位试验为主要研究对象,定量研究了不同生物炭用量和秸秆还田对主要氮循环过程的影响。主要包括施用生物炭和秸秆还田对土壤氮素矿化、土壤pH值、氨氧化微生物、反硝化微生物、土壤微生物量碳氮以及土壤 N_2O 排放的影响和作用机理,为改善农田土壤氮素循环、减缓土壤 N_2O 排放提供一定的理论依据和技术支撑。

全书共九章,内容包括生物炭和秸秆还田对农田土壤氮素循环的影响,研究区域概况和研究内容,施用生物炭和秸秆还田对土壤氮素矿化的影响,施用生物炭和秸秆还田对土壤氨氧化细菌的影响,施用生物炭和秸秆还田对土壤反硝化细菌的影响,施用生物炭和秸秆还田对土壤微生物量的影响,施用生物炭和秸秆还田对土壤 N_2O 排放的影响,施用生物炭和秸秆还田对作物产量的影响,结论与展望。为了全面反映生物炭和秸秆还田对农田土壤氮素循环的影响最新研究成果,本书参考或引用了大量相关文献,其中大多数已在书中注明出处,但难免有所疏漏。在此,向有关作者和专家表示感谢。

本书凝聚了许多农业生态学科科研人员的智慧和见解,感谢中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所张庆忠研究员、杜章留研究员、王一丁博士在试验设计及实施过程中的意见和建议,感谢研究生张星、鲁宁、赵建坤在试验实施过程中的辛苦付出,本书的出版凝聚着他们的汗水和心血。感谢中国农业大学吴文良研究员、孟凡乔研究员为本研究的顺利进行提供了良好的试验平台,感谢山东省淄博市桓台县试验站胡正江站长、耿凤梅女士提供了良好的后勤服务和热心帮助。感谢国家自然科学基金项目“华北典型农田土壤硝化反硝化过程及 N_2O 排放对生物炭施用的响应机制(41773090)”、国家自然科学基金青年基金项目“连续多年施用生物炭

对华北农田土壤 N_2O 排放的影响及机制研究(31300375)”、国家水体污染控制与治理科技重大专项“海河下游多水源灌排交互条件下农业排水污染控制技术集成与流域示范课题(2015ZX07203-007)”的共同资助。

由于著者水平有限,加之野外长期定位试验的变异性等问题,不可避免地带来氮素通量的计算误差,所得结论可能不尽完善,书中错误或不妥之处在所难免,诚恳希望同行和读者批评指正,敬请各位专家提出宝贵意见。

著者

2018年12月

目 录

1	生物炭和秸秆还田对农田土壤氮素循环的影响	1
1.1	生物炭和秸秆还田对土壤氮素矿化的影响	3
1.2	生物炭和秸秆还田对土壤氨挥发和铵淋失的影响	5
1.3	生物炭和秸秆还田对土壤硝化作用的影响	7
1.4	生物炭和秸秆还田对土壤反硝化作用的影响	8
1.5	生物炭和秸秆还田对土壤微生物量的影响	10
1.6	生物炭和秸秆还田对土壤固氮作用的影响	11
1.7	研究中存在的问题	13
2	研究区域概况和研究内容	15
2.1	研究区域概况	15
2.2	研究内容	16
3	施用生物炭和秸秆还田对土壤氮素矿化的影响	25
3.1	生物炭和秸秆还田对土壤 NO_3^- -N含量的影响	26
3.2	生物炭和秸秆还田对土壤 NH_4^+ -N含量的影响	29

3.3	生物炭和秸秆还田对土壤pH值的影响	31
3.4	小麦—玉米轮作期其他因素对土壤矿质氮和pH值的影响 ...	32
3.5	讨论与结论	37
4	施用生物炭和秸秆还田对土壤氨氧化细菌的影响	40
4.1	生物炭和秸秆还田对土壤AOA丰度的影响	41
4.2	生物炭和秸秆还田对土壤AOB丰度的影响	43
4.3	生物炭和秸秆还田对土壤AOA/AOB的影响	46
4.4	小麦—玉米轮作期其他因素对土壤氨氧化微生物的影响	48
4.5	讨论与结论	49
5	施用生物炭和秸秆还田对土壤反硝化细菌的影响	52
5.1	生物炭和秸秆还田对土壤亚硝酸还原酶 (<i>nirK</i> 、 <i>nirS</i>) 基因的影响	53
5.2	施用生物炭和秸秆还田对土壤氧化亚氮还原酶 (<i>nosZ</i>) 基因的影响	56
5.3	生物炭和秸秆还田对 <i>nirK/nirS</i> 、(<i>nirK+nirS</i>) / <i>nosZ</i> 比例的影响	58
5.4	小麦—玉米轮作期其他因素对土壤反硝化微生物的影响	61
5.5	讨论与结论	63
6	施用生物炭和秸秆还田对土壤微生物量的影响	65
6.1	不同处理土壤MBC的变化	66
6.2	不同处理土壤MBN的变化	67
6.3	不同处理土壤MBC/MBN的变化	68
6.4	土壤MBC、MBN及MBC/MBN的变异程度	69
6.5	土壤温度和土壤水分与土壤微生物量的关系	70

6.6 讨论与结论	72
7 施用生物炭和秸秆还田对土壤 N_2O 排放的影响	76
7.1 生物炭和秸秆还田对 N_2O 排放规律的影响	77
7.2 小麦—玉米轮作期其他因素对温室气体 N_2O 排放量的影响 ...	80
7.3 讨论与结论	81
8 施用生物炭和秸秆还田对作物产量的影响	84
8.1 生物炭和秸秆还田对作物产量的影响	85
8.2 生物炭和秸秆还田对作物产量构成因素的影响	86
8.3 讨论与结论	88
9 结论与展望	91
9.1 主要结论	91
9.2 展望	93
参考文献	95

生物炭和秸秆还田对农田 土壤氮素循环的影响

氮素是作物生长必需的大量营养元素，也是农业可持续发展的根本要素。施用氮肥是提高作物产量的重要措施，但长期以来人们为追求高产大量施用氮肥，我国氮肥利用率极低，目前仅为30%~35%，损失率约为45%（巨晓棠等，2014）。过量施用氮肥不仅使肥料利用率降低，还导致了一系列的环境问题，例如农田生态系统的温室气体排放持续增加是加剧全球气候变化的重要原因。 N_2O 是一种重要的温室气体，其增温效应为 CO_2 的296~310倍，对温室效应的贡献率约占5%（Solomon, 2007）。据最新估计，2010年全球农业系统排放的 N_2O -N为4.1~4.4Tg（Oenema et al., 2014），我国农田生态系统平均每年向大气排放 N_2O -N约为0.36Tg，约占人为源排放量的60%，约占全球农业总排放量的11%。

中国作为一个农业大国，其对全球 N_2O 排放的影响，已经成为全球变化研究的焦点之一（Bouma, 2001; IPCC, 2007; Zou et al., 2010）。因此，在这种背景下，寻找一种减缓 N_2O 排放的有效措施是解决该问题的关键。如何有效提高氮素利用率、减缓农田土壤温室气体排放已成为目前研究的热点问题，具有重要的科学意义和现实意义。近年来，施用生物炭和秸秆还田成为提高农田土壤氮素利用率，减少温室气体排放的主要方式，然而秸秆进入土壤腐解时会排放大量温室气体，因而将秸秆制成生物炭加以利用已逐渐成为重要的农艺措施。

生物炭是生物残体（木屑、作物秸秆、动物粪便、城市固体垃圾等）在缺氧的条件下，经高温慢热解（通常 $<700^\circ\text{C}$ ）产生的一种具有较高碳含量并能长期稳定存在于土壤中的固态物质（Rutigliano et al., 2014; 宋延静等, 2010）。生物炭具有稳定性高、较大的比表面积和疏松多孔的特性，在农田施用可显著减缓温室气体排放，降低土壤容重，有效固持土壤水分和养分，改善土壤理化性质，为作物生长提供良好环境。生物炭同时具备固持土壤硝态氮和铵态氮的能力，因而有望显著提高作物的氮素利用率。然而，不同类型的生物炭由于制备原料、生产条件、土壤环境各异，施用后带来的氮固持效应也不尽相同。近年的研究表明，生物炭在调节土壤性状和减缓气候变化方面有着巨大的应用前景（袁金华等, 2011; Glaser et al., 2009），引起了全球环境学家、农学家和土壤学家越来越多的关注（Glaser et al., 2009）。

生物炭在土壤碳截留、温室气体减排及土壤质量改良等方面均具有潜在作用（Lehmann et al., 2009），施入土壤后，会产生很多有益的作用，如能够有效改善土壤结构，利用生物炭高孔隙度的特性，增加土壤中 NH_3 和 NH_4^+ 的含量，从而提高土壤对氮素的持留作用（Clough et al., 2010; Saleh et al., 2012; Spokas et al., 2012）。不仅如此，生物炭还能够减少 NO_3^- 的淋溶损失以及温室气体的排放（Harter et al., 2013），改变土壤氮素的迁移动态（Clough et al., 2013），又可以增加生物固氮能力，影响土壤微生物群落的组成（Clough et al., 2010; 马秀枝等,

2014)。同时,作为一种人为添加的新型物质,生物炭通过改变土壤基本理化性质及在土壤中的降解过程,直接或间接地影响了土壤氮素在周转过程中硝化菌、反硝化菌和固氮菌的多样性、活性及丰度(潘逸凡等,2013)。但大多数研究都因为试验条件、生物炭的性质及土质类型等的不同而得到不尽相同的结果,且微生物对生物炭的响应机制以及生物炭与氮肥的交互作用机制并不明确。为此,本书系统总结了近年来国内外科学界关于生物炭在土壤氮素转化方面的研究现状和发展趋势,为生物炭合理施用以及生物炭与土壤氮素转化的相互作用提供一定的参考依据。

秸秆中氮素资源丰富,越来越多的人们开始重视以其为主的农田土壤培肥措施。秸秆还田措施不仅可有效避免秸秆焚烧带来的环境污染问题,而且还能改善土壤物理性状,增加土壤有机碳、全氮、碱解氮、钾素和作物产量等(Guo et al., 2006; 叶丽丽等, 2010; 张自常等, 2010)。同时秸秆还田能够减少氮肥施用量、氮素损失及 N_2O 排放,提高水肥利用率,增强土壤中的培肥效果(Guo et al., 2006; 闫翠萍等, 2011)。但大多数研究都因为试验条件、生物炭及秸秆还田的性质及土质类型等的不同而得到不尽一致的结果,且微生物对生物炭及秸秆还田的响应机制并不明确。

1.1 生物炭和秸秆还田对土壤氮素矿化的影响

氮素矿化是指土壤中的有机氮在土壤动物和微生物的作用下,由难以被植物吸收利用的有机态氮转化为可被植物直接吸收利用的无机态氮的过程(刘宝东, 2006)。土壤氮素矿化是土壤氮素转化的重要过程之一,土壤氮素的矿化水平直接决定了土壤中氮的周转速率和土壤的供氮能力。研究表明,土壤氮素矿化过程受多种因素的影响,其中土壤温度和水分是影响土壤氮矿化最主要的因素(巨晓棠等, 1998; 裴志永

等, 2003; Liu et al., 2010), 并对矿化速率有强烈的控制作用。土壤对植物的氮素供应量主要取决于土壤中有有机氮的矿化量(王常慧等, 2004), 而氮素矿化过程又与养分释放有关(Manzoni et al., 2008)。土壤的净氮矿化决定了作物可利用氮素的多少, 反映了土壤中实际释放氮素的能力(Luxhøi et al., 2006), 因此土壤氮素矿化是自然生态系统植物有效氮的主要来源, 并了解土壤供氮能力提供了重要的依据。

试验研究过程中, 由于土壤性状和生物炭制备条件等多方面的差异, 添加生物炭对土壤有机氮矿化过程的影响效果明显不同。有研究认为, 施用生物炭能够增加氮素矿化速率(Chen et al., 2010; Woolf et al., 2010; Castaldi et al., 2011)。Nelissen等(2012)通过试验研究发现, 把350℃和550℃用玉米青贮饲料制备的生物炭分别添加到相同的肥沃沙质土壤中, 两者的土壤总氮矿化量明显不同, 前者为 $2.63\mu\text{gN}/(\text{g}\cdot\text{d})$, 后者为 $2.34\mu\text{gN}/(\text{g}\cdot\text{d})$, 且添加生物炭后, 土壤总氮矿化率增加了185%~221%, 由此从该试验中可见, 肥沃的沙质土壤中加入生物炭后, 对土壤有机氮矿化有促进作用, 而且350℃条件下制备的生物炭与550℃条件下制备的生物炭相比, 更有利于土壤进行氮素矿化作用。Berglund等(2004)研究发现, 土壤中添加生物炭后, 提高了土壤中微生物赖以生存的可溶性碳含量, 从而加速微生物活动, 致使氮素矿化作用会显著增强, 进而增加了土壤中无机氮的汇集(Taghizadeh-Toosi et al., 2012)。然而, 也有报道在农田土壤中施用生物炭没有发现类似的效应(DeLuca et al., 2006; Lehmann et al., 2011), 甚至会导致氮矿化速率降低(Deenik et al., 2010; Dempster et al., 2011)。而Dempster等(2012)的研究发现, 随着生物炭的加入, 土壤的微生物量氮明显减少, 从而导致土壤中有机氮的矿化也随之减弱。同样Deenik等(2010)也证实了在农田和草地土壤中加入生物炭后, 降低了这2种土壤的氮素矿化作用这一结论。但是DeLuca等(2006)认为, 将生物炭添加到这2种土壤之后, 生物炭并没有影响土壤的氮素矿化。Maestrini等(2014)发现, 添加生物炭降低了土壤中硝态氮含量, 从而降低了氮素对作物的

供应。这可能由于生物炭能够吸附土壤溶液中 NH_4^+ ，从而降低了溶液中 NH_4^+ 的浓度。因此，关于生物炭对土壤氮素矿化作用的影响，不同条件下会得出不同的结论，还需要进一步地深入分析不同条件下的影响机理。

作为外源作物秸秆，其投入能对土壤中有机质氮素的矿化产生一定影响，具体表现是由于外源植物秸秆的添加，土壤中有机质会呈现出加速或减缓的现象，这一现象称为激发效应。Guenet等（2010）研究显示，激发效应（Priming Effect, PE）强度并不与外源有机质的投入呈线性关系，而正PE在新鲜有机质（Fresh Organic Matter, FOM）投入增加时会降低，且C/N没有系统地影响到PE强度。马力等（2011）发现在红壤水稻土中长期秸秆还田，与单施氮肥相比，可以明显提高红壤水稻土氮素矿化量，且在温度较高情况下，秸秆还田配施无机肥料对红壤水稻土氮素矿化量的提高更大。陈保青（2013）的研究结果表明，因采用不同的耕作方式，与保护性耕作秸秆还田相比，常规耕作秸秆还田降低了土壤中矿化氮总量。综上所述，生物炭与秸秆还田对土壤中氮素矿化作用的影响，会因不同条件下得出不一样的结论，需进一步分析其影响机理。

1.2 生物炭和秸秆还田对土壤氮挥发和铵淋失的影响

土壤中的氮素通过淋溶损失、地表径流流失以及氮挥发和 N_2O 排放等途径，会流失到土壤、水体和大气中，不仅使湖泊、河流等产生严重的富营养化，对地表水和地下水造成污染，导致环境恶化，还给大气环境和气候带来影响（金洁等，2005；刘玉学等，2011）。因此，采用科学的水肥管理措施，探索出能够有效降低氮素损失的治理方法，对以提高氮肥利用率与降低氮素对环境的污染为目标的绿色农业具有积极意义。

诸多研究认为，生物炭对 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NH_3 这3种氮素形态都有着

明显的吸附作用（何绪生等，2011）。Ding等（2010）的试验研究表明，竹炭通过阳离子交换可以吸附 NH_4^+-N ，并在20cm土层中， NH_4^+-N 的损失降低了15.2%。Singh等（2010）发现，分别在550℃和400℃的条件下制成的生物炭施入土壤后，对土壤中 NH_4^+ 和 NO_3^- 均存在较强的持留作用。Beck等（2011）证实生物炭能够有效控制土壤中氮素的流失，添加7%的生物炭减少了土壤因径流流失的硝态氮和总氮浓度，改善了径流水质。通过生物炭对土壤根际 NO_3^- 的定位研究，Duvall等（2011）表明，作为主要氮源的 NO_3^- 在添加生物炭后，其淋失量明显降低。同样，Kameyama等（2012）的研究中得出，在热解温度为700~800℃条件下，所形成的蔗渣木炭对土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 具有吸附作用，特别是在800℃制备的蔗渣炭增加了作物根区 NO_3^- 的停留时间，为作物吸收 NO_3^- 提供了更大的机会，从而提高作物的氮素利用率。但究竟选用哪种生物炭的制备条件和施用范围到目前还没有统一的标准，需要根据实际应用情况来确定。

在如何减少氨挥发损失的研究中，生物炭也起到了重要的作用。当土壤中生物炭的施用量为 $15\text{t}/\text{hm}^2$ 或者 $30\text{t}/\text{hm}^2$ 时， ^{15}N 标记的反刍动物尿液中 NH_3 挥发量降低了45%，而植物组织吸收的 ^{15}N 增加了，且随后的植物生长也未受到影响，进而证实了经生物炭吸附后的 ^{15}N 能够被植物所吸收利用（Taghizadeh-Toosi et al., 2012）。Sun等（2014）将生物炭添加到农业土壤和森林土壤中发现，生物炭对 NH_3 的吸附作用与土壤的孔隙状况有关，森林土壤的孔隙比农业土壤孔隙大，从而对 NH_3 的吸附作用也就相对较小。此外，研究者在探索生物炭吸附 NH_3 的机制后，认为生物炭表面丰富的酸性官能团可能潜在地改变着对 NH_3 的吸附作用（Asada et al., 2002; Kastner et al., 2009）。尽管有大量的文献报道生物炭通过吸附氮素以有效控制农田氮素流失，提高了土壤保肥能力，但是关于生物炭影响不同土壤类型 NH_3 排放的潜在机制尚不明确，亟待通过相关的试验研究加以验证。

1.3 生物炭和秸秆还田对土壤硝化作用的影响

硝化作用可分为氨氧化与亚硝化作用两个阶段：第一个阶段是含编码催化反应的氨单加氧酶（*amoA*）的两种菌，即氨氧化细菌（*ammonia-oxidizing bacteria*, AOB）和氨氧化古菌（*ammonia-oxidizing archaea*, AOA）来完成 NH_3 （氨）的氧化过程，是硝化反应的限速步骤（Yao et al., 2011；燕平梅等，2014；贺纪正等，2009）；第二个阶段主要依靠*nxr*基因主导来编码催化土壤中的亚硝化反应（潘逸凡等，2013）。土壤中的硝化作用受多种因素的影响，例如：土壤通气条件、质地、水分含量、温度、pH值及施肥因素等。将生物炭添加到土壤中后，能够显著提高土壤pH值（Sohi et al., 2010；Chan et al., 2008；Masulili et al., 2010），而相关的研究证实，土壤的pH值是影响氨氧化古菌或氨氧化细菌群落结构、丰度和多样性的主要因素（王亚男等，2013；Nicol et al., 2008），进而对土壤的硝化作用产生影响。通过采用盆栽培养的方式，王晓辉等的研究表明，当稻秆生物炭输入到酸性土壤后，提高了土壤的pH值，继而引起土壤中氨氧化细菌丰度的增加，从而增强了土壤中的硝化潜势。Ball等（2010）研究发现，生物炭添加到土壤中，可以增加酸性森林土壤中氨氧化细菌的丰度，从而提高土壤的硝化速率，由此他们推测这或许是由于土壤中木炭含量的增加导致pH值变化所引起的。

生物炭提高土壤pH值只是作为对土壤中氮素硝化作用起到积极效果的原因之一，原因之二可能是生物炭表面多孔性特征显著，加上水肥的吸附作用能够为土壤微生物提供良好的栖息环境，保护土壤中的有益微生物（Steinbeiss et al., 2009），进而提高了氨氧化细菌和氨氧化古菌群落的丰度，加速了土壤硝化作用相应的进程。此外，Kookana等（2011）提出，经生物炭改良土壤后，可以降低酚类化合物的浓度。这可能是酚类化合物被生物炭吸附后，抑制了硝化细菌的增长，继而间接地促进了土壤的硝化作用。而在DeLuca等（2009）的研究中却证明，在农业和草地土壤添加生物炭，对硝化作用可能没有影响，但是由于 NH_4^+ 吸附或固

定, 氨化作用略有下降。因此, 生物炭究竟是如何影响土壤硝化作用的进程及其机理尚无较为科学的解释, 特别是由于生物炭对土壤硝化作用的影响很可能与其本身的材质、工艺条件及土壤性质等有关, 硝化功能菌群和氨氧化菌群对生物炭的响应机制需要进一步研究, 同时针对相关的菌落丰度来预测硝化速率, 还有待通过相应的试验研究提供科学的理论依据。

目前已有关于秸秆还田对土壤硝化作用影响的报道, 在秸秆还田方式与施肥对水稻土壤微生物学特性的影响中, 刘骁倩等 (2013) 试验结果说明, 稻秆翻埋还田后, 改变了土壤肥力、营养物质, 从而也改变了微生物的活性, 最终提高了土壤中氨氧化细菌的多样性与丰富度。Doran (1980) 还发现秸秆还田能够使放线菌、细菌、真菌数量增加2~6倍, 而硝化细菌数量增加则更多。蒋廷杰等 (2006) 将稻草还田后, 结果显示投入大量C/N比高的稻草秸秆不能增加土壤氨化细菌的繁殖和提高其活性, 反而致使土壤氨化作用强度下降到较低的水平。但是如何在适量秸秆还田的情况下, 采取有效技术措施, 提高土壤氨化作用强度, 降低土壤硝化作用强度, 减少N素损失, 是当前亟待解决的问题。

1.4 生物炭和秸秆还田对土壤反硝化作用的影响

反硝化作用也称脱氮作用, 它是指在缺氧条件下, 由反硝化细菌将硝酸盐转化成可溶性的亚硝酸盐, 再继续还原为NO与N₂O, 最后以N₂形式释放到大气中的过程 (Zhang et al., 2012)。其中, 作为反硝化细菌的功能标志物硝酸还原酶基因 (*narG*), 主导着反硝化过程中的第一步反应, 即将NO₃⁻催化还原为NO₂⁻ (陈哲等, 2009)。反硝化作用不仅能够造成氮肥的损失, 又被认为是土壤产生N₂O的主要途径之一, 因此研究反硝化过程中产生的N₂O/N₂的比例与其影响因素 (范晓晖等, 2002), 可为进一步改进施肥管理措施, 提高土壤的氮素利用率, 减少N₂O排放提