

秸秆还田与作物氮素利用关系研究

谢志煌^{1,2}, 李彦生¹, 于镇华¹, 刘俊杰¹, 王光华¹, 刘晓冰¹, 金 剑¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 黑土区农业生态重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 秸秆还田改善土壤化学性质, 并为作物提供养分, 进而可减少化肥施用量。开展还田秸秆的氮素转化、量化秸秆的供氮能力, 以及作物对秸秆氮素的利用情况等方面的研究对于全面评价秸秆还田效果是必不可少的。文章综述了秸秆还田对氮素循环和共生固氮的影响, 总结了作物对秸秆氮素的利用率, 以及¹⁵N示踪技术在秸秆还田后的氮素转化研究中的应用。提出今后应加强典型土壤上秸秆氮转化及作物利用秸秆氮的研究, 尤其是大豆共生固氮与秸秆氮利用的关系, 重点解析作物根际效应对秸秆氮矿化的影响。参 83。

关键词: 秸秆还田; 作物氮吸收; 氮素利用; ¹⁵N示踪技术

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

Impacts of Residue Return on Nitrogen Utilization in Crops: A Review

XIE Zhihuang^{1,2}, LI Yansheng¹, YU Zhenhua¹, LIU Junjie¹, WANG Guanghua¹, LIU Xiaobing¹, JIN Jian¹

(1. Key laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Residue return can provide nutrients for crops due to residue mineralization, thereby reducing the application of chemical fertilizers. Investigations on the mineralization of residue nitrogen (N) in soil, the supply capability of residue N to crops, and the use efficiency of residue N by crop plants are essential to assess the gain of residue return in agricultural systems. We reviewed the effect of residue return on nitrogen cycling and nitrogen fixation in legumes, and the crop utilization of residue N. The application of ¹⁵N labeling technique in the studies on the turnover of residue N was also addressed. It is essential to further study the turnover of residue N and crop use efficiency of residue N in typical soils, especially the association of symbiotic N fixation with the utilization of residue N. The rhizospheric effect on the mineralization of residue N would be the most interesting aspect in the mechanisms of the utilization of residue N.

Key words: residue return; crops nitrogen uptakes; nitrogen utilization; ¹⁵N labeling technology

0 引 言

秸秆还田是传统农业的重要技术措施, 在农业生产中发挥着重要作用。秸秆的生物量占作物总量的 50% 左右, 秸秆的去向对农田生态系统的物质循环与能量流动影响很大^[1]。我国作为粮食生产与油料生产大国, 作物秸秆资源丰富, 据估计全国每年产生秸秆总量超过 7 亿 t^[2]。然而, 由于秸秆的传统农业生产要素被工业产品所替代, 秸秆利用率很低, 焚烧现象严重, 这不仅造成资源浪费, 更造成严重的环境污染。大多数农业发达国家都将秸秆还田视为一项重要的农业措施, 而在我国秸秆还田却没有受到足够的重视, 我国秸秆直接还田量约为 9 200 万 t, 仅占当年全国秸秆可收集利用总量的 14% 左右^[3]。

秸秆还田方式可分为直接还田与间接还田。直接还田是处理作物秸秆最便捷高效的途径^[4], 主要有: (1) 高茬还田, 作物收割时秸秆留茬较长, 机械翻耕入土。此途径具有较高投入效益, 且翻耕后秸秆分布较为均匀, 应用较广^[5]; (2) 覆盖还田, 作物收割后秸秆直接或粉碎以后覆盖还田, 有利于保水保墒和增加土壤有机质含量; (3) 秸秆粉碎翻压还田, 作物收割后将秸秆粉碎后撒入地里, 用秸秆还田机或

收稿日期: 2016-03-22; 修回日期: 2016-06-03.

基金项目: 中国科学院百人计划项目; 黑龙江省杰出青年基金 (JC201413); 国家自然科学基金 (41271261)。

第一作者简介: 谢志煌 (1992-), 男, 福建龙海人, 在读硕士, 研究方向为作物生理生态。

通讯作者: 金 剑 (1974-), 男, 吉林舒兰人, 研究员, 主要从事作物生理生态。

翻耕机将秸秆翻入土中。粉碎翻压还田有利于秸秆腐解,但是机械化程度较高^[1]。间接还田方式主要包括:(1)堆沤还田,是将秸秆与泥土、粪尿等混合腐熟后制成堆肥、沤肥后再施入田间的方法;(2)过腹还田,是将秸秆作为饲料喂养牲畜,经牲畜消化吸收后以粪尿形式还田^[5]。

秸秆还田是有效的农田培肥措施,可以提高土壤有机质含量与养分循环利用率、平衡作物养分^[5-6],显著改变作物的源与库关系。针对我国主要农区的秸秆还田调查表明,秸秆还田普遍具有较好的作物增产效果^[7],并能够改良土壤、蓄水保墒、调节地温及减少化肥投入量,缓解土壤酸化,改善作物生长的农田生态环境^[8]。因此秸秆还田技术备受关注,关于秸秆还田的研究不断深入。

氮素是作物所需的重要营养元素,适量施用氮肥是提高作物产量的有效手段^[9]。然而,人们为了追求高产,过量的施用超过植物、微生物需求的氮肥,这些过量的氮主要以硝态氮的形式流失^[10],使氮肥的利用效率降低、并造成大量浪费以及引发面源污染^[11]。作物收获也是氮素支出的主要途径,很大程度上决定了氮素的输出量,从而影响到土壤中的氮素养分循环^[12]。秸秆的浪费,加上氮肥的使用不当,加快了土壤供氮能力的下降,进而破坏农田生态系统的稳定性。

秸秆还田、生物群落动态以及氮素有效性3者之间有密切的相关性^[13],秸秆还田可以通过促进微生物生长而减少氮素硝化淋溶^[14]。秸秆的添加显著改变了土壤碳氮比,对于微生物主导的矿化作用产生一定的影响,从而影响到有机氮的矿化与矿质氮的微生物固持^[15],进而影响作物生长。

虽然秸秆还田增产效果与培肥土壤效应越来越受到重视^[16-17],但是关于秸秆还田的增产效果还存在争议,秸秆还田导致减产的现象时有报道^[15,18]。主要原因是秸秆能否代替化肥供给作物所需的养分目前还没有定论。因此,有必要区分作物从秸秆中吸收的氮量,了解作物对秸秆氮素养分的利用情况,研究秸秆供氮与土壤供氮能否满足作物对氮素的需求,从而为进一步研究解析秸秆还田生态效应提供理论参考。

1 秸秆还田对氮素循环的影响

1.1 不同种类秸秆的氮素差异

不同作物秸秆的氮素含量差异很大。鲁如坤^[19]、赵林萍^[20]等针对几种主要作物秸秆的氮素养分含量进行了调查,结果表明,麦秸、稻草、玉米秸、豆秸和油菜秸的氮素百分比含量分别为0.27~0.86、0.34~1.12、0.48~0.77、0.49~1.3和0.56~0.90,由此提出不同作物秸秆的氮素含量差异明显。秸秆氮素的差异一方面表现在总氮含量,秸秆氮含量决定了秸秆最终向农田系统供应的氮含量;另一方面,不同类型秸秆之间木质素、纤维素、单宁、蛋白质、糖、淀粉及氨基酸等含氮化合物的存在形式及含量也有很大的差异^[21-22]。Singh等^[23]测得小麦秸秆中纤维素、木质素含量分别为51.2%和21.2%,王金主等^[24]报道了玉米秸秆中纤维素、木质素含量分别为32%和15.4%。南雄雄等^[25]研究发现,玉米秸秆比小麦秸秆更易腐解,秸秆添加32天后,玉米秸秆处理碳累积释放量达 $2.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而小麦秸秆处理碳累积释放量仅有 $1.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。秸秆含氮量过高不利于微生物活性的保持^[26],秸秆总氮含量及其化学组分限制了微生物对秸秆的降解速度^[22],将影响秸秆还田后的氮素矿化进程从而影响到下茬作物对氮素的吸收情况。

1.2 秸秆还田对作物氮吸收的影响

不同秸秆类型影响作物的氮素吸收量。多数研究认为,秸秆还田对作物氮吸收起到促进作用^[27]。严奉君等^[28]研究了不同秸秆还田对稻田氮素利用的影响,结果表明,秸秆还田可提高水稻干物质与氮素积累,小麦秸秆的作用优于甜菜秸秆。由于两者氮素含量相近,还田效果差异可能是由于小麦质量与体积较小,更加适应稻田的干湿交替的腐熟环境。卢萍等^[29]研究表明,麦秸(碳氮比为72)、绿肥(碳氮比小于36)均能提升作物产量。不施肥处理中,相对于麦秸不还田,麦秸还田可提升水稻产量10.2%,绿肥还田可提升水稻产量9.4%。而绿肥还田在 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥施用量下产量明显高于麦秸还田的各种施肥处理,氮的吸收量也高,两者差异是由于绿肥分解速度更快,氮矿化率高。张晓雨^[30]选用小麦秸秆(碳氮比高于80)和大豆秸秆(碳氮比为46.6),发现两者覆盖处理对小麦氮素吸收均具有促进作用,且豆秸效果较好。然而,也有研究得出相反结果。单鹤翔等^[15]研究发现,不施肥前提下施用玉米秸秆显著降低了冬小麦地上部氮素累积量,同不还田处理相比,高肥力土壤冬小麦地上部氮素累积量减少66.3%,

低肥力土壤氮素累积量减少 66.0%。张金涛等^[18]研究发现,小麦整个生育期在单施秸秆条件下氮吸收量下降,与不施肥相比,低氮素土壤秸秆还田小麦生物量减产 79%,高氮素土壤减产 74%。

秸秆还田对于作物氮素吸收的影响较为复杂。微生物所能分解的有机质碳氮比一般为 25:1^[31],大部分作物秸秆的碳氮比均远高于微生物活动的最适范围。因此,在秸秆还田初期,微生物的固持作用会大于矿化作用,此阶段微生物的固持作用可以减少氮素硝化淋溶量^[32]。随着微生物生命活动的进行,碳氮比逐渐降低,净矿化率将会逐渐提升,秸秆还田的正激发效应将会随之增强以供作物吸收,不同类型的秸秆由于碳氮比值的差异影响到氮矿化与固持的耦合进程从而影响到作物的氮素吸收。另一方面,不同类型秸秆的残体组分不同^[33],对秸秆的分解性也产生重要的影响,从而影响到作物对其氮素的吸收。此外,不同秸秆类型的添加对土壤粘性、土壤通透性等的影响存在差异^[34],这种差异会通过影响硝态氮的淋溶作用与作物的根系发展而影响到作物的氮素吸收量。

2 作物提高氮素利用率的机制

2.1 作物根系与氮素利用率关系

秸秆氮矿化为作物可吸收的氮形态后,需通过作物根系吸收为植株利用。在以根系为主导的养分吸收活动中,氮素的有效性对根系发育影响最为显著^[35]。作物根系为维持矿质养分的平衡,应对土壤环境的异质性及其养分胁迫,进化出了复杂的根系系统以提高对养分的吸收效率^[36]。在养分充足的区域作物根系较为发达,而在养分贫瘠的区域作物根系生长情况较差^[37]。针对冬小麦的研究表明,在较深的土层,植物的根系生长并没有对土壤氮素含量的改变进行响应,在较高的氮素供应水平下,根系增长有可能是源于其地上部分光合作用的增强^[38]。

作物根系的分布情况影响到根系与养分的接触面积,决定了扩散抵达根际的养分利用率^[39]。黄毅等^[40]研究发现,秸秆深还田可增强玉米扎根性能,扩展根系分布空间。传统耕作模式玉米的根系主要分布在 10 cm ~ 20 cm 土层。秸秆深层还田施入秸秆深度为 35 cm ~ 40 cm,玉米根系则集中分布在 21 cm ~ 30 cm 土层。林蔚刚等^[41]将耕作深度在 10 cm 内的灭茬还田与免耕模式对比,研究发现灭茬还田与免耕模式大豆根系均集中分布在 0 ~ 10 cm 土层,免耕条件下根系大豆生物量最低。10 cm ~ 20 cm 免耕模式下大豆根长、根表面积、根体积和根干重比例均低于灭茬还田。慕平等^[42]研究发现浅耕玉米秸秆还田能促进玉米根系在较深层次发育,相比不还田处理,秸秆还田显著改善了玉米根系在 20 cm 以下土层的分布情况。秸秆还田促进根系的拓展发育很可能与提高土壤养分,改善耕作层的土壤物理性状等有关。

2.2 根系分泌物与氮素有效性的关系

植物根系分泌物,广义概念上是指其活体根系所产生的渗出物、粘胶质、分泌物及其残体与脱落物等的降解物,狭义上仅指植物体根系所分泌的各种化学物质^[43]。按其成分可分为两类,一类为低分子分泌物,其主要成分有糖类、酚类、有机酸及各种氨基酸等。另一类是高分子分泌物,其主要成分有酶类和粘胶,粘胶主要有多糖和多糖醛酸^[44]。

氮素有效性与根系分泌物之间是相互作用的。一方面,氮素有效性影响根系分泌物的数量及其组成;另一方面,植物可以通过根系分泌物来影响氮素有效性^[45]。常二华等^[46]研究发现,低氮或缺氮处理促进水稻根系衰老,分泌能力降低,各种分泌物不同程度减少。徐国伟等^[47]研究发现,秸秆还田以及中氮处理可以提高水稻根系活性从而利于养分的吸收,但是在高氮处理下其活性反而降低。雍太文等^[48]研究发现,根系分泌物影响土壤中氮素的有效性,可以调节作物根际的 pH、土壤湿度及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等的含量,并通过对环境的改善促进氮的矿化与作物对氮素的吸收。

土壤微生物、土壤酶活性是影响秸秆矿化的两个关键因素,根系分泌物可以通过影响土壤微生物、土壤酶活性进而对秸秆的矿化进程产生影响^[49]。根系分泌物对根际微生物群落结构有塑造作用,秸秆腐解残留率与根际微生物群落优势度显著相关^[50],秸秆腐解物为微生物活动提供养分,而微生物又决定了秸秆的矿化进程。植物根系分泌物和土壤微生物是土壤酶的主要来源^[51],秸秆矿化与土壤酶活性相互反馈,秸秆还田可以刺激土壤酶活性的增强,而土壤酶活性直接影响秸秆的矿化^[52]。因此根系分泌物在一定程度上影响秸秆的分解速率。然而,根际分泌物影响秸秆氮的矿化的微生物过程和机制尚不明确。

2.3 秸秆还田条件下的作物根际

土壤-根系-微生物之间相互作用,共同组成了一个与养分相互交流的根际微域^[53]。根际环境涉及土壤-根系、土壤-微生物、根系-微生物等多个相互作用的界面,与植物体相互作用密切。在秸秆还田的作用下,作物根系、根际分泌物以及微生物群落发生变化,对作物氮素吸收、作物生长发育等产生影响。其中,微生物是根际物质循环的主要推动力,对氮素矿化作用起到决定性作用,而根系分泌物又决定了根际的微生物种类及其数量,对根际生态系统及生态功能起到调节作用^[54]。氮素的有效性是由土壤与作物相互作用的微域环境所决定^[45],而微生物群落结构的改变也对根系分泌物、秸秆腐解、氮素循环有着重要的影响,进而影响到作物根系的生长及对氮素的吸收利用。

由于根际微域效应影响有机物料氮的矿化作用,从而提升作物对氮素的吸收以及土壤中氮素的利用效率,减少传统化学肥料的施用,对农田生态系统的保护和高效生产意义重大,因此,有关有机物料对化肥的替代作用的研究是目前作物-土壤互作研究的一个重点。

3 秸秆还田与氮固定

3.1 豆科作物利用秸秆氮前景

秸秆腐解速度缓慢,秸秆中氮素的可利用性以及其对土壤有机氮的矿化与矿质氮的微生物固持的耦合进程的影响是限制秸秆还田技术推广的重要原因。合理利用秸秆可以减少氮素淋失,如果还田操作不当易导致作物缺乏可利用氮素。Nicholson等^[55]研究发现,添加秸秆会使土壤速效氮含量降低,秸秆还田量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮减少 $10\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。闫德智等^[56]研究表明,秸秆分解的前两个月内,秸秆释放的可供作物利用的氮素仅占土壤矿质氮库的10%~15%。

豆科作物的氮素利用具有与禾本科不同的特点和要求,共生固氮是豆科作物获取氮素的重要途径,是豆科作物相对其他作物的重要优势。大豆是氮素需求量较高的作物,很大一部分氮素来源是通过与根瘤菌的共生固氮获得的,共生固氮可以供给大豆50%以上的氮素^[57]。而花生生物固氮占到41.3%~56.9%^[58]、豌豆的生物固氮量占总氮吸收量的62%~70%^[59]。豆科作物每年的共生固氮数量可达 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ~ $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[60],相对其他作物而言,豆科作物对土壤氮素的需求比例较小,秸秆还田条件下不易受到氮养分胁迫。因此,秸秆还田技术在豆科作物的种植产业中更有推广应用的前景。

3.2 秸秆还田对大豆氮固定的影响

适量氮肥的施用可以提高大豆产量,然而根瘤对于氮肥十分敏感,足量的氮素可以对根瘤原基发育成根瘤的过程产生抑制作用,进而抑制根瘤生长^[61]。徐凤花等^[62]研究表明秸秆的添加可有效缓解氮肥对大豆固氮活性的抑制作用,添加麦秸处理在田间施氮 $20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,大豆产量分别提高了5.1%和23.0%。汤树德等^[63]发现秸秆还田可以通过促进大豆结瘤提高固氮活性,进而提高大豆的干物质积累及其生物学产量。在白浆土中添加麦秸处理,大豆花荚期单株根瘤数和单株根瘤干重较不添加秸秆处理分别提高108.1%和96.1%,草甸土提高52.4%和92.3%。秸秆异于化学肥料,一方面其矿化为无机氮的进程较慢,对根瘤生长的抑制较小,有利于根瘤生长;另一方面,随着秸秆的分解,微生物活动作用减弱,所固持氮素进一步矿化成为大豆籽粒发育时期的可利用氮素,进一步促进大豆氮固定效率^[64]。然而,秸秆氮和共生固氮的相互关系以及对大豆氮吸收的贡献还有待于进一步明确。

大豆在生育初期可以利用种子储藏的氮素,此时外源氮素对大豆并无生理影响^[65]。在幼苗时期大豆共生体系尚未建立,固氮能力较弱,需要土壤为大豆的生长提供氮素^[64]。吕晓波^[66]研究表明,不施肥前提下,添加秸秆降低土壤中的速效氮有效性,不利于大豆根系从土壤中吸收氮素,大豆容易出现氮素缺乏症。此外,秸秆对无机氮的吸持以及秸秆在粘粒表面的吸附阻碍铵离子迁移通道等非生物固持作用对大豆生育前期氮素吸收都有一定的限制作用^[67-68]。此后随着根瘤固氮能力的提高,至第4片复叶展开以后,大豆氮胁迫逐渐得到改善。随着秸秆的矿化,结荚初期秸秆矿质态氮的微生物固持作用将达到最大值,随后被固定的氮会重新分解释放,但是由于大豆在全生育期的氮素吸收量不足,因此产量低于正常施氮水平^[68]。汤树德^[69]则认为,在不施氮肥前提下,秸秆全生育期处在纯固定氮素的过程中,秸秆虽然有利于根瘤形成,但是不利于根系从土壤中吸收氮素,只有当补氮量达到麦秸重量的0.5%才能使麦秸矿化释放

氮素。大豆植株干物质积累对其根瘤固氮活性的依赖是显著的^[63]，但只有根瘤固氮量和土壤供氮量都能满足大豆需求才能提高大豆生产量。所以，在一定的土壤环境条件下定量研究大豆全生育期的秸秆供氮能力，以及根瘤固氮量对提高秸秆还田效益和大豆生产的节本增效意义重大。

3.3 秸秆还田对其它豆科作物氮固定的影响

我国秸秆资源丰富，而豆科作物在农业生产中历来占有重要地位，秸秆还田技术在各类豆科作物种植中均有应用。毛桂祥等^[70]研究表明，秸秆还田可提高蚕豆产量，增加经济效益，不添加秸秆处理产量仅 $3\ 394\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，显著低于添加秸秆处理的 $3\ 884\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在红壤旱地的研究表明^[71]，仅覆盖秸秆不施化肥导致花生减产 32.2%，不施肥处理在有无秸秆覆盖下，花生氮素累积量都显著低于施肥处理。花生是高产喜肥的豆科作物，秸秆还田可以促进作物氮素吸收，但是仅靠秸秆供肥无法满足花生高产要求。

针对豆科植物氮固定的研究主要集中在间作体系，关于秸秆还田对豆科作物氮固定影响的研究较少。Rerkasem 等^[72]研究表明，玉米与饭豆间作可提高系统固氮量高达 $32\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Xiao 等^[73]研究表明，小麦-蚕豆间作能够显著提高蚕豆的固氮能力，间作地上部分固氮量增加 33%。间作体系禾本科作物与豆科植物竞争土壤氮素、吸收部分豆科作物根瘤固定的氮素，从而提高豆科作物固氮效率。秸秆还田处理可以促进微生物对氮素的固持作用，同时秸秆也能吸持部分氮素。因此，秸秆也能缓解豆科作物固氮过程中受到无机氮的抑制作用。由此，解析秸秆还田对各种豆科作物固氮作用的影响，具有重大意义。

4 秸秆氮素利用率

还田秸秆所释放出的氮素去向较为复杂，大体上可分为支出部分及土壤存留部分。其中，支出部分可分为被当季作物所吸收、淋溶作用迁移以及以气态形式逸失，土壤存留的氮一部分成为土壤腐殖质组分，一部分残留于秸秆中。

秸秆的施入量、施入方式对于秸秆还田后氮素的去向以及各去向的氮分配量有很大的影响^[69]，外源有机物料所含氮素大部分以不同形态残存在土壤中。徐新宇等^[74]应用¹⁵N 示踪技术研究麦秸还田中氮的去向，结果表明铺施麦秸处理平均约有 68% 的氮素残存于土壤中，夏谷地上部对施入秸秆氮的利用率为 28.3%，高于混施麦秸的 20.6%，类似现象也出现在籽粒中。王西娜^[75]通过¹⁵N 标记法发现秸秆覆盖还田下，小麦地上部对施入秸秆氮的利用率为 10.2%，87.9% 的氮残留于土壤。黄婷苗等^[76]研究了玉米秸秆氮释放对小麦氮吸收的影响，结果表明小麦地上部分吸收的氮有 1.9%~3.4% 来自秸秆，68% 的氮留在半腐解、未腐解的秸秆中，地上部分吸收的秸秆氮总量不受施肥水平影响，籽粒所吸收的氮则显著受到施氮影响。

作物对秸秆氮素的吸收量受到较多因素的影响，一方面还田秸秆种类、当季作物种类对秸秆的腐解与作物氮素吸收有较大的影响，另一方面，不同时期所施肥料类型与施肥量也有较大的差异。以上研究中秸秆的氮素去向表明，秸秆中的氮被作物利用的只有很小一部分，大部分未被作物利用而残存于土壤中，主要原因可能是秸秆的碳氮比高于微生物活动所需的碳氮比，导致微生物以吸收土壤中速效氮为主对秸秆进行分解，因此秸秆的氮素分解速度较慢，下茬作物整个生长季中秸秆仍有大量氮素未矿化，难以被作物吸收。

有研究认为，土壤肥力是秸秆氮素当季回收率的主要影响因素，高肥力土壤会促进氮素向作物籽粒中转移，提高秸秆氮素当季利用率^[15]。秸秆的氮素利用状况既与秸秆本身物质构成有关，也与土壤类型等环境条件有关。土壤肥力会影响到秸秆分解、矿质态氮的固持与矿化，进而影响作物对秸秆氮素的吸收。但是目前这方面的比较研究却很少。因此，有必要针对不同土壤类型，开展秸秆还田措施在提高氮素作物利用率，增加产量，减少氮素损失方面的研究。

5 ¹⁵N 示踪技术在氮素转换研究的应用

¹⁵N 示踪技术可以研究氮素在生态系统中的固定、分配及其转化。自上世纪 40 年代起，¹⁵N 示踪技术开始得到推广^[77]。同位素¹⁵N 不会对生态环境产生干扰，保障了实验开展与测定的安全性以及结果的准确性^[78]，因此被广泛应用于农业生态系统氮素养分循环的研究中。借助¹⁵N 示踪技术可以同时测定多个反应

过程并且进行量化,深入了解氮素循环转化过程。随着 ^{15}N 示踪技术的应用,目前的技术已经能够辨别出有机氮库和矿化氮库中氮的存在形式^[79]。

秸秆氮素利用率可以采用测定氮肥利用率所使用的差值法、示踪法两种方法测定。差值法是假设施肥作物和不施肥作物吸收的土壤养分量相同,用施肥与不施肥作物收获养分量的差值与施肥养分量的比值表示肥料养分的作物利用率^[80]。在氮肥利用率、秸秆代替氮效率的研究中使用较多,一般用差值法测定氮肥利用率的结果高于 ^{15}N 示踪技术的结果,这是由于氮肥促进了土壤氮素的吸收^[81]。因此,在评价氮素供应效果时采用差值法能够真实反映作物氮素吸收的实际增加量。而在研究氮素去向时只有采用示踪法才能消除其余因素的干扰。

鉴于 ^{15}N 示踪技术安全性与准确性,许多研究者将 ^{15}N 示踪技术应用于氮素转化的研究中。Cheng等^[82]应用 ^{15}N 标记不同有机肥料,研究不同碳氮比的有机肥料对根际生态系统氮素转化的影响;黄婷苗^[76]应用 ^{15}N 示踪技术在关中黄土地区研究还田玉米秸秆氮释放对土壤供氮和冬小麦氮吸收的影响。应用 ^{15}N 示踪技术可以实时动态监测秸秆氮在植物与根际环境之间的转化与利用情况,研究秸秆氮素对作物氮的供应,区别植物吸收利用的氮素来源,准确地反映植物吸收利用秸秆氮素的情况,既能保证实验结果的安全可靠,又不会对环境产生污染。基于 ^{15}N 示踪技术安全性与准确性,随着 ^{15}N 示踪技术在标记、分析技术上的不断突破, ^{15}N 示踪技术必将得到更广泛的使用。

6 研究展望

不同作物秸秆氮素含量及其存在形式有着显著差异^[33],而微生物对秸秆的降解速度受限于秸秆降解的难易程度,作物对秸秆氮素的吸收利用状况势必因不同秸秆降解进程的差异而发生变化。目前关于作物对不同秸秆类型氮素的利用状况的对比研究不多。利用 ^{15}N 示踪技术进行作物对不同类型秸秆氮素的吸收利用情况的研究十分重要。

虽然秸秆还田能够提高土壤有机质含量、补充土壤氮库,但作物对秸秆氮素的利用情况受到土壤氮素水平的影响,土壤肥力是影响秸秆氮素利用率的主要因素^[15]。土壤氮素水平会影响秸秆分解、矿质态氮的固持与矿化,进而影响作物对秸秆氮素的吸收。如果土壤氮素含量较低,会影响秸秆矿化速度,导致秸秆全生育期处在纯固定氮素的过程中,将不利于作物对秸秆氮素的吸收^[69]。另外,不同的秸秆还田技术直接影响秸秆利用效率,虽然有研究者从秸秆粉碎程度、翻耕深度以及翻耕时间等方面做了不同的研究,在我国不同地区秸秆还田技术还存在较大差异,所以应针对不同地区的土壤和种植作物的特点开展适应当地的秸秆还田技术及氮转化利用的研究。

我国很多地区在农业粮食生产中的不合理施用化肥导致土壤供氮能力差异较大,甚至秸秆还田的增产效果比不上传统农业,有关作物对秸秆氮素的利用效率研究变得十分迫切^[83],尤其是在我国东北黑土地区,土壤氮素水平受到垦殖耕作影响较大,总氮含量低于开垦之前。作物不同生育期需氮情况有所差异,只有秸秆氮素释放与作物需氮情况相耦合才能达到秸秆还田的增产目的。所以,在不同地区,尤其在东北寒地黑土区上开展关于秸秆氮素转化季节性规律研究,解析作物对秸秆氮素的利用情况,可为高效秸秆还田技术提供理论参考。

豆科作物根际氮素循环过程异于禾本科作物,秸秆在豆科作物根际微域的作用机理与供氮情况也与禾本科作物有所不同^[57]。根瘤固氮作用是豆科作物利用氮素的一大优势,同时也是研究豆科作物对秸秆氮素利用情况的一个难点。目前关于小麦等作物对秸秆氮素的吸收利用情况有所报导^[75],但是针对豆科作物对秸秆氮素的吸收与其分配情况的研究较少。秸秆还田条件下,豆科作物的氮素循环过程尚不清楚。应用 ^{15}N 示踪技术探知豆科作物对秸秆中氮素的吸收利用与分配情况对种植大豆的轮作和间作体系的养分高效利用有重要意义。

参考文献:

- [1] 李文革,李倩,贺小香. 秸秆还田研究进展[J]. 湖南农业学报, 2006(1): 46-48.
- [2] 潘剑玲,代万安,尚占环,等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.

- [3] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [4] 安丰华, 王志春, 杨帆, 等. 秸秆还田研究进展 [J]. 土壤与作物, 2015, 4 (2): 57-63.
- [5] 刘芳, 张长生, 陈爱武, 等. 秸秆还田技术研究及应用进展 [J]. 作物杂志, 2012 (2): 18-23.
- [6] Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. The assessment and utilization of straw resources in China [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9 (12): 1807-1815.
- [7] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结 [J]. 土壤通报, 2002, 33 (5): 336-339.
- [8] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果 [J]. 应用生态学报, 2002, 13 (5): 539-542.
- [9] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (4): 783-795.
- [10] Fisk L M, Barton L, Jones D L, et al. Root exudate carbon mitigates nitrogen loss in a semi-arid soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 380-389.
- [11] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method [J]. *Pedosphere*, 2006, 16 (2): 245-252.
- [12] Dinnes D L, Karlen D L, Jaynes D B, et al. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94 (1): 153-171.
- [13] 张金波, 宋长春. 土壤氮素转化研究进展 [J]. 吉林农业科学, 2004, 29 (1): 38-43, 46.
- [14] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35 (1): 143-154.
- [15] 单鹤翔, 卢昌艾, 张金涛, 等. 不同肥力土壤下施氮与玉米秸秆还田对冬小麦氮素吸收利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (1): 35-41.
- [16] 闫德智, 王德建. 长期施用化肥和秸秆对水稻土碳氮矿化的影响 [J]. 土壤, 2011, 45 (4): 529-533.
- [17] 石洪艾, 尤孟阳, 李禄军, 等. 长期施用有机物料下黑土氮素有效性及其与作物产量的关系 [J]. 生态学杂志, 2012, 31 (9): 2283-2288.
- [18] 张金涛. 玉米秸秆直接还田对土壤中氮素生物有效性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [19] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数 [J]. 土壤通报, 1996, 27 (4): 145-150, 154.
- [20] 赵林萍. 中国种植业大观 (肥料卷) [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2001.
- [21] Trinsoutrot I, Recous S, Bentz B, et al. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (3): 918-926.
- [22] Gentile R, Vanlauwe B, Chivenge P, et al. Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2008, 40 (9): 2375-2384.
- [23] Singh S, Ghoshal N, Singh K P. Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (1): 76-86.
- [24] 王金主, 王元秀, 李峰, 等. 玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 山东食品发酵, 2010 (3): 44-47.
- [25] 南雄雄, 田霄鸿, 张琳, 等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (3): 626-633.
- [26] 刘四义, 贾淑霞, 张晓平, 等. 玉米和大豆秸秆还田对黑土微生物量及呼吸的影响 [J]. 土壤与作物, 2014, 3 (3): 105-111.
- [27] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, 204: 40-50.
- [28] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1): 23-35.
- [29] 卢萍, 杨林章, 单玉华, 等. 绿肥和秸秆还田对稻田土壤供氮能力及产量的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38 (1): 39-42.
- [30] 张晓雨. 秸秆还田腐解特征及其对土壤环境和小麦生长的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [31] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
- [32] Crews T E, Peoples M B. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72 (2): 101-120.
- [33] 黄耀, 沈雨, 周密, 等. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27 (2): 183-188.
- [34] 姜洁, 陈宏, 赵秀兰. 农作物秸秆改良土壤的方式与应用现状 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (8): 420-423.
- [35] Marschner H, Kirkby EA, Cakmak T. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 1255-1263.
- [36] Aibara I, Miwa K. Strategies for optimization of mineral nutrient transport in plants: multilevel regulation of nutrient-dependent dynamics of root architecture and transporter activity [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2014, 55 (12): 2027-2036.
- [37] Robinson D, Linehan D J, Gordon D C. Capture of nitrate from soil by wheat in relation to root length, nitrogen inflow and availability [J]. *New Phytologist*, 1994, 128 (2): 297-305.
- [38] Svoboda P, Haberle J. The effect of nitrogen fertilization on root distribution of winter wheat [J]. *Plant Soil and Environment*, 2006, 52 (7): 308-313.
- [39] King J, Gay A, Sylvester-Bradley R, et al. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: Towards an economic optimum [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91 (3): 383-390.
- [40] 黄毅, 毕素艳, 邹洪涛, 等. 秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2013, 21 (5): 109-112.
- [41] 林蔚刚, 吴俊江, 董德健, 等. 不同秸秆还田模式对大豆根系分布的影响 [J]. 大豆科学, 2012, 31 (4): 584-588.
- [42] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (3): 291-296.
- [43] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响 [J]. 华北农学报, 2008, 23 (S1): 182-186.

- [44] 吴佳, 涂书新. 植物根系分泌物对污染胁迫响应的研究进展 [J]. 核农学报, 2010, 24 (6): 1320-1327.
- [45] 张锡洲, 李廷轩, 王永东. 植物生长环境与根系分泌物的关系 [J]. 土壤通报, 2007, 38 (4): 785-789.
- [46] 常二华, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期氮磷营养水平对水稻根系分泌物的影响及其与稻米品质的关系 [J]. 作物学报, 2007, 33 (12): 1949-1959.
- [47] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究 [J]. 草业学报, 2014, 23 (2): 140-146.
- [48] 雍太文, 陈小容, 杨文钰, 等. 小麦/玉米/大豆三熟套作体系中小麦根系分泌特性及氮素吸收研究 [J]. 作物学报, 2010, 36 (3): 477-485.
- [49] 朱雪竹, 黄耀, 杨新中. 模拟酸雨对不同土壤有机碳和作物秸秆分解的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20 (2): 480-484.
- [50] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (4): 743-752.
- [51] 刘苹, 赵海军, 仲子文, 等. 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (11): 3332-3339.
- [52] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (2): 517-527.
- [53] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤-根系-微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展 [J]. 土壤, 2015, 47 (2): 210-219.
- [54] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2014, 38 (3): 298-310.
- [55] Nicholson F A, Chambers B J, Mills A R, et al. Effects of repeated straw incorporation on crop fertilizer nitrogen requirements, soil mineral nitrogen and nitrate leaching losses [J]. Soil Use and Management, 1997, 13 (3): 136-142.
- [56] 闫德智, 王德建, 张刚, 等. ^{15}N 标记秸秆在太湖地区水稻土上的氮素矿化特征研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (1): 77-85.
- [57] Bluck G M, Lindsey L E, Dorrance A E, et al. Soybean yield response to rhizobia inoculant, gypsum, manganese fertilizer, insecticide, and fungicide [J]. Agronomy Journal, 2015, 107 (5): 1757-1765.
- [58] 孙虎, 李尚霞, 王月福, 等. 施氮量对不同花生品种积累氮素来源和产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (1): 153-157.
- [59] Jensen E S. Grain yield, symbiotic N_2 fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops [J]. Plant and Soil, 1996, 182 (1): 25-38.
- [60] Schipanski M E, Drinkwater L E, Russelle MP. Understanding the variability in soybean nitrogen fixation across agroecosystems [J]. Plant and soil, 2010, 329 (1-2): 379-397.
- [61] 乔云发, 韩晓增. 长期定量施肥对大豆根系形态和根瘤性状的影响 [J]. 大豆科学, 2011, 30 (1): 119-122.
- [62] 徐凤花, 崔占利, 刘永春, 等. 保护性施氮对大豆氮素同化影响的研究 [J]. 土壤学报, 1998, 35 (4): 536-544.
- [63] 汤树德, 石晶波. 秸秆还田对大豆结瘤状况、固氮活性和生育产量的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1986, 1: 9-16.
- [64] 吕晓波. 大豆保护性施氮技术及其应用前景 [J]. 大豆科学, 2001, 20 (2): 138-140.
- [64] 王立刚, 刘景辉, 刘克礼, 等. 大豆对氮素吸收规律的研究 [J]. 中国农学通报, 2004, 20 (6): 162-165.
- [66] 吕晓波, 汤树德. 麦秸和氮肥对大豆结瘤固氮和植株氮形态的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1989 (1): 99-112.
- [67] Accoe F, Boeckx P, Videla X, et al. Estimation of gross nitrogen transformations and nitrogen retention in grassland soils using FLUAZ [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (6): 1967-1976.
- [68] 梁斌. 有机肥与化肥长期配施协调土壤供氮的效应及机理 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [69] 汤树德, 徐凤花, 隋文志, 等. 保护性施氮对大豆生育和产量的影响 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 1995, 8 (2): 15-24.
- [70] 毛桂祥, 高金丽, 贺艳波. 水稻秸秆还田配施促腐剂对后茬作物蚕豆产量的影响 [J]. 云南农业科技, 2012 (5): 12-13.
- [71] 成艳红, 武琳, 钟义军, 等. 控释肥对稻草覆盖红壤花生产量及土壤有效氮平衡的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (2): 306-313.
- [72] Rerkasem B, Rerkasem K, Peoples M B, et al. Measurement of N_2 fixation in maize (*Zea mays* L.) -ricebean (*Vigna umbellata* [Thunb.] Ohwi and Ohashi) intercrops [J]. Plant and Soil, 1988, 108 (1): 125-135.
- [73] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ^{15}N techniques [J]. Plant and Soil, 2004, 262 (1): 45-54.
- [74] 徐新宇, 张玉梅, 胡济生. 应用 ^{15}N 示踪研究麦秸还田中氮的去向 [J]. 土壤学报, 1989, 26 (1): 64-71.
- [75] 王西娜. 西北旱地残留氮的作物利用及覆盖土壤有机氮研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [76] 黄婷苗, 郑险峰, 王朝辉. 还田玉米秸秆氮释放对关中黄土供氮和冬小麦氮吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (14): 2785-2795.
- [77] Norman A G, Werkman C H. The use of the nitrogen isotope ^{15}N in determining nitrogen recovery from plant materials decomposing in soil [J]. Agronomy Journal, 1943, 35 (12): 1023-1025.
- [78] Schroeder-Moreno M S, Greaver T L, Wang S, et al. Mycorrhizal-mediated nitrogen acquisition in switchgrass under elevated temperatures and N enrichment [J]. GCB Bioenergy, 2012, 4 (3): 266-276.
- [79] Müller C, Rütting T, Kattge J, et al. Estimation of parameters in complex ^{15}N tracing models by Monte Carlo sampling [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39 (3): 715-726.
- [80] 沈善敏. 关于肥料利用率的猜想 [J]. 应用生态学报, 2005, 16 (5): 781-782.
- [81] 王巧兰, 吴礼树, 赵竹青. ^{15}N 示踪技术在植物 N 素营养研究中的应用及进展 [J]. 华中农业大学学报, 2007, 26 (1): 127-132.
- [82] Cheng Y, Zhang J B, Müller C, et al. ^{15}N tracing study to understand the N supply associated with organic amendments in a vineyard soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51 (8): 983-993.
- [83] 耿贵, 汪景宽, 於丽华, 等. 不同作物根系对黑土中各氮组分含量的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41 (6): 1344-1348.