



免耕覆盖还田下玉米秸秆氮素的去向研究*

胡国庆^{1, 2} 刘 肖^{1, 2} 何红波^{1†} 张旭东^{1, 3}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院沈阳生态试验站, 沈阳 110016)

摘 要 采用田间微区试验, 以¹⁵N标记的玉米秸秆为研究对象, 研究了免耕覆盖还田下玉米秸秆氮素经过4个生长季后的作物累积利用率、在土壤(0~60 cm)的残留率以及损失情况。试验共设2个处理: T_{s1}为第1年¹⁵N标记秸秆覆盖还田, 此后秸秆不还田; T_{s2}为第1年¹⁵N标记秸秆覆盖还田, 此后每年以非标记秸秆还田。结果表明: 经过4个生长季后, 两个处理间的玉米籽粒、秸秆的累积产量及总氮素吸收量的差异均不显著。在T_{s1}处理中, 秸秆氮素在籽粒和秸秆中的累积回收率分别为14.2%和6.7%, 并分别高于T_{s2}处理的12.4%和5.8%。与作物的累积回收率相比, 更多的秸秆氮素被保持在土壤中。在T_{s1}和T_{s2}处理中, 秸秆氮素在土壤中的残留率分别为40.9%和73.8%, 而损失率分别为38.6%和8.1%。与T_{s1}处理相比, T_{s2}处理中较高的土壤微生物生物量碳和氮以及较低的矿质态秸秆氮的含量, 说明连续秸秆还田在一定程度上提高了最初还田秸秆氮素在土壤中的微生物固持并降低了秸秆氮素的淋失风险, 从而显著提高秸秆氮素在土壤-植物系统中的总回收率。因此, 在温带农田生态系统中, 长期的免耕结合秸秆覆盖还田可促进秸秆氮素的积累, 这对提高和保持土壤氮素含量和稳定性具有重要的意义。

关键词 ¹⁵N标记; 秸秆氮素; 秸秆还田; 土壤-植物系统

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

中国是秸秆产量大国, 且由于农业综合生产能力的提高, 作物秸秆产量不断增长^[1]。研究表明, 农作物秸秆还田不仅带入相当数量的碳、氮、磷、钾等营养元素, 而且具有改善土壤理化性状, 提高土壤肥力和作物产量等作用^[2-4]。因此, 发展秸秆还田不但可以避免焚烧秸秆带来的环境污染, 而且可以充分利用秸秆资源, 对实现农业可持续发展具有重要意义。目前, 国内针对秸秆还田开展了大量研究, 但大多集中在秸秆分解过程、秸秆还田对作物产量和品质、土壤肥力、水分状况和微生物性状等影响方面, 而有关免耕秸秆覆盖还田下秸秆氮素去向的研究报道较少^[2-7]。

与无机化学肥料不同, 秸秆氮素的作物利用和在土壤中的转化、积累与秸秆的分解过程密切相关^[8-10]。对于秸秆的分解速率和过程, 国内外学者进行了较多的研究, 发现主要受到的影响因素有秸秆质量, 主要包括其碳氮比、木质素含量、多酚类含量^[6, 11]; 秸秆的施用方式, 例如, 秸秆表施及与土壤混施等^[12]; 环境和土壤因素, 如降雨量、气温和土壤生物、质地等^[13]。这些内在的和环境等因素共同影响着秸秆氮素的释放和转化, 并改变其在土壤-植物系统的时空转移和分配。

目前, 利用¹⁵N示踪技术, 一些研究人员研究了翻压、混施条件下秸秆氮素在土壤-植物系统的

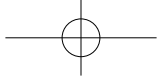
* 国家自然科学基金重点项目(41135024)和国家自然科学基金面上项目(41271251)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41135024 and 41271251)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hehongbo@iae.ac.cn

作者简介: 胡国庆(1985—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事土壤氮素循环及其环境效应研究。E-mail: huguoqing536@163.com

收稿日期: 2015-12-14; 收到修改稿日期: 2016-03-28; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-07

http://pedologica.issas.ac.cn



回收率^[14-17]。然而,在不同秸秆还田方式和气候环境下,秸秆具有不同的分解速率和养分释放动态。与翻压、混施秸秆还田相比,免耕覆盖还田下秸秆具有较长的分解周期,可能形成独特的秸秆养分利用和累积特征^[18-19]。因此,本研究在辽宁省下辽河平原建立大田微区,通过设置¹⁵N标记玉米秸秆还田处理,研究了玉米秸秆覆盖还田下经过4个生长季后(秸秆完全腐解)秸秆氮素的作物累积吸收利用、在土壤中的残留以及损失情况,以期能够进一步提高我们对免耕秸秆覆盖还田下秸秆氮素对作物氮素吸收和土壤氮素积累贡献的认识,这对发展温带地区农田养分管理和秸秆资源利用策略具有重要的指示意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院沈阳生态试验站(41°32' N, 122°23' E)进行。该站地处下辽河平原,属温带湿润-半湿润大陆性季风气候,年平均气温7~8℃,无霜期147~168 d,年降雨量约700 mm(降雨量最大月份发生在7月、8月)。下辽河平原是东北地区重要的粮食产区,主要作物为玉米和水稻,农作物为典型的一年一熟制,该地区土壤类型为潮棕壤。试验开始于2009年,开始前0~20 cm土壤的基本理化性状:pH为6.3,土壤无机氮和全氮含量分别为16.7 mg kg⁻¹和1.01 g kg⁻¹,有机碳含量为10.37 g kg⁻¹,砂粒、粉粒和黏粒分别占15.3%、66.1%和18.6%,0~10、10~20、20~40和40~60 cm土层容重分别为1.17、1.44、1.45和1.38 g cm⁻³。供试作物为玉米,品种为富有1号。

1.2 试验设计

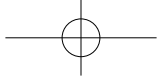
田间微区试验:在大田中布设1.6 m × 1.3 m的微区,微区之间设置约3 m的保护行。微区四周用PVC板隔开,外围垂直挖50 cm深,PVC板上方露出地表10 cm,在布置PVC板时要求不破坏微区土壤原有结构。每个微区种植12株玉米。设置2个¹⁵N标记秸秆还田处理(T_{S1}和T_{S2}),每个处理3次重复。处理1为:¹⁵N标记玉米秸秆在2009年4月底播种后还田,此后在每年(2009—2012年)收获期移除小区中产生的所有玉米秸秆(T_{S1});处理2为:¹⁵N标记玉米秸秆在2009年4月底播种后还田,此后在每年(2009—2012年)收获期移除小区中

产生的所有玉米秸秆,并以非标记的玉米秸秆还田(T_{S2})。2个处理中氮、磷、钾肥料的年施用量分别为N 200 kg hm⁻²、P 30 kg hm⁻²、K 58 kg hm⁻²。在播种时施用N 50 kg hm⁻²、P 30 kg hm⁻²、K 58 kg hm⁻²作为底肥;2次追肥(氮肥)主要发生在拔节期(每年的6月末)和吐丝期(每年的7月末),追肥用量分别为N 100和50 kg hm⁻²^[20]。供试的¹⁵N标记玉米秸秆是收获于先前进行的¹⁵N标记氮肥的示踪试验,标记玉米秸秆的¹⁵N丰度(茎和叶的加权丰度^[10])为31.8%。在整个试验期间,每年的秸秆还田量为5.8 Mg hm⁻²(约为单位面积秸秆产量的50%),其中还田秸秆中秸秆氮素的含量达到48.3 kg hm⁻²。在本研究中还田的玉米秸秆长度约为15 cm,还田方式为覆盖还田。

1.3 样品采集与指标测定

在每年(2009—2012年)成熟期,收获玉米籽粒和秸秆后随机采取一部分,在65℃烘箱中烘至恒重,然后,磨碎过0.15 mm细筛备用。在第4年成熟期(2012年9月底)采集土壤样品,土壤样品用直径3 cm的土钻采取,按0~20或0~10和10~20、20~40以及40~60 cm分层采集,取土过程中应防止上层¹⁵N标记土壤对下层土壤的污染。每个微区取6点混匀,混匀的土壤样品过2 mm筛子并捡去可见的植物残体及根系,然后取出一部分密封储存于4℃冰箱进行可交换态无机氮和微生物生物量碳、氮的测定,其余部分风干研磨过0.15 mm细筛以进行其他相关指标的测定。

土壤和植株样品全氮含量和¹⁵N同位素分别用元素分析仪(Model CN, vario Macro Elemental Analyser System, GmbH, Germany)和同位素比例质谱仪(Finnigan MAT 251, USA)测定。土壤矿质态氮用2 mol L⁻¹ KCl浸提(水土比4:1),取20 ml KCl浸提液于蒸馏瓶中,加入MgO进行蒸馏(此时蒸馏的是铵态氮),待铵态氮蒸馏完成后,将代氏合金粉直接加入到MgO蒸馏液中再次蒸馏(此时蒸馏的是硝态氮),所有蒸馏液均用硼酸接收,H₂SO₄滴定。将前后两次接收的蒸馏液混合并添加1 mg标准N,然后加1滴6 mol L⁻¹ H₂SO₄进行酸化,将蒸馏液在60℃烘箱中烘至2~3 ml,最后无机氮浓缩液的¹⁵N丰度在中国科学院南京土壤研究所测定^[9]。土壤微生物生物量碳、氮用氯仿熏蒸浸提法提取^[4],利用TOC分析仪(multi C/N 3000, analitikjena, Germany)测定。土壤容重采



用环刀法测定。

1.4 数据处理与分析

秸秆¹⁵N在植株和土壤样品中的回收率参照下面的公式进行计算^[10, 21]：

样品¹⁵N回收率(%) = (样品¹⁵N回收量/¹⁵N施用量) × 100

秸秆¹⁵N在土壤-植物系统中的总回收率 = 秸秆¹⁵N在植株中的累积回收率 + 秸秆¹⁵N在土壤(0~60 cm)中的回收率

由于在经过4个生长季后，初始还田的¹⁵N标记秸秆已经完全腐解，因此，根据下面的公式计算秸秆¹⁵N的损失率^[22]：

秸秆¹⁵N损失率 = 100% - 秸秆¹⁵N在植株中的累积回收率 - 秸秆¹⁵N在土壤(0~60 cm)中的回收率

在进行以上计算时均扣除植株和土壤样品的¹⁵N丰度背景值。采用SPSS 13.0进行数据分析，显著性检验 $p < 0.05$ 。采用SigmaPlot 12.0作图。

2 结 果

2.1 作物的产量和氮素吸收量

由表1不同处理对作物累积产量和氮素吸收量的影响可见，在经过4个生长季后，玉米籽粒

和秸秆的累积产量分别为48.9~49.0和47.1~47.7 Mg hm⁻²，年平均产量分别达到了12.2~12.3和11.8~11.9 Mg hm⁻²。籽粒和秸秆的累积产量和年平均产量在单次秸秆还田(T_{S1})和连续秸秆还田(T_{S2})下差异均不显著($p > 0.05$)。同样地以籽粒和秸秆之和表示的地上部生物量的累积量在处理间的差异也不显著($p > 0.05$)。对于不同部位的产量而言，籽粒与秸秆的差异不显著，比值在1.03~1.04之间。

经过4个生长季后，籽粒和秸秆的累积氮素吸收量分别达到654.0~664.5 kg hm⁻²和324.3~334.5 kg hm⁻²，而年平均氮素吸收量分别为163.5~166.1 kg hm⁻²和81.1~83.6 kg hm⁻²(表1)。籽粒和秸秆氮素吸收量处理间的差异均不显著($p > 0.05$)。通过对比发现，籽粒氮素吸收量是秸秆的1.95倍~2.05倍，籽粒的氮素吸收量占玉米植株地上部氮素吸收总量的66.2%~67.2%，而秸秆只占32.8%~34.8%。经过4个生长季后，作物地上部对秸秆氮素的总吸收利用率达到18.2%~20.9%，其中籽粒吸收了12.4%~14.2%并占地上部秸秆氮素吸收总量的67.9%~68.0%。T_{S1}处理的作物对秸秆氮素的累积利用率显著高于T_{S2}处理($p < 0.05$)。

表1 不同处理对玉米籽粒和秸秆的累积产量和氮素吸收量的影响

Table 1 Effect of maize stalk mulching on accumulative yield of grain and stalk and N uptake in grain and stalk relative to treatment

处理 Treatment	累积产量 Accumulative yield (Mg hm ⁻²)		氮素吸收总量 Total N uptake (kg hm ⁻²)		秸秆氮素利用率 Recovery rate of N in mulch (%)	
	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	籽粒 Grain	秸秆 Stalk
T _{S1}	48.9 ± 3.6	47.7 ± 4.3	654.0 ± 47.6	334.5 ± 23.8	14.21 ± 0.63	6.72 ± 0.49
T _{S2}	49.0 ± 4.0	47.1 ± 3.2	664.5 ± 55.8	324.3 ± 26.9	12.36 ± 0.71	5.80 ± 0.32

注：T_{S1}：在第1年¹⁵N标记玉米秸秆还田，此后秸秆不还田；T_{S2}：在第1年¹⁵N标记玉米秸秆还田，此后每年非标记玉米秸秆还田。下同 Note: Treatment T_{S1}, mulched with ¹⁵N-labelled stalk only in the first year; and Treatment T_{S2}, mulched with ¹⁵N-labelled stalk in the first year and then with unlabelled stalk in the subsequent years. The same below

2.2 秸秆氮素在不同层次土壤的含量

由图1a可见，在经过4个生长季后，在0~10 cm土层的¹⁵N丰度最高，随着土层加深，土壤的¹⁵N丰度显著降低，而在20~60 cm土层，土壤的¹⁵N丰度在较低水平保持相对稳定。在T_{S1}和T_{S2}处理中，0~10 cm土层的秸秆氮素含量分别为11.2和

23.7 mg kg⁻¹(图1b)，对土壤全氮含量的贡献分别达到1.7%和2.0%；在10~20 cm土层，秸秆氮素的含量显著降低，分别为1.4和3.8 mg kg⁻¹；在较深土层(20~60 cm)，秸秆氮素含量相对较少(0.32~0.77 mg kg⁻¹)并保持相对稳定。在0~10和10~20 cm土层，T_{S2}处理的¹⁵N丰度和秸秆氮素含

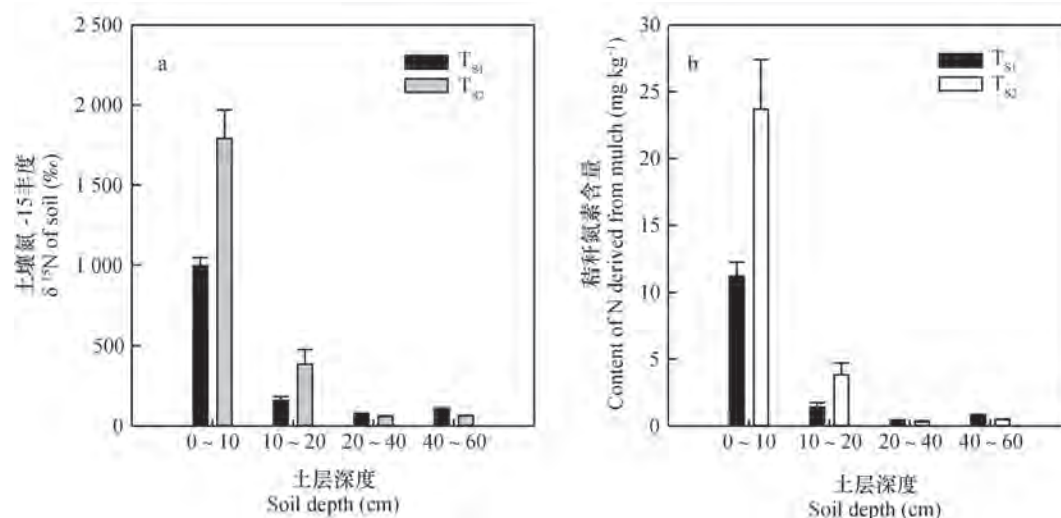


图1 经过4个生长季后各土层的 ^{15}N 丰度 (a) 和秸秆氮素含量 (b)

Fig. 1 Distribution of ^{15}N abundance (a) and content of the nitrogen brought in with mulch (b) in the soil profile after 4 crops of maize

量显著高于 T_{s1} 处理 ($p < 0.05$)，随着土层加深，2个处理间的 ^{15}N 丰度和秸秆氮素含量差异不显著 ($p > 0.05$)。

2.3 秸秆氮素在土壤-植物系统中的回收率及损失率

经过4个生长季后，在 T_{s1} 处理下，作物地上部吸收的秸秆氮素占施入秸秆氮素的20.9% (图2)，其中主要分布在籽粒中 (14.2%，表1)；而在 T_{s2} 处理下，秸秆氮素的作物累积回收率为18.2%，低于 T_{s1} 处理。在 T_{s1} 和 T_{s2} 处理中，秸秆氮素在土壤 (0~60 cm) 中的残留率分别为40.9%和73.8% (图2)。与 T_{s1} 处理相比， T_{s2} 处理显著提高了初始还田秸秆氮素在土壤中的残留率 ($p < 0.05$)。

秸秆氮素在土壤中的残留率和在植株地上部的累积利用率之和代表秸秆氮素在土壤-植物系统的总回收率。在经过4个生长季后，有61.4%~91.9%的秸秆氮素进入到土壤-植物系统中。秸秆氮素在土壤中的残留率占在土壤-植物系统中总回收率的66.6%~80.3%。在 T_{s2} 处理下总回收率较 T_{s1} 处理下高30.5%，两个处理间差异极显著 ($p < 0.05$)，并且主要是由秸秆氮素在土壤中的显著差异造成的。经过4个生长季后，初始还田秸秆已经完全腐解，通过差减法计算出通过各种途径损失的秸秆氮素在 T_{s1} 处理中达到38.6%，显著高于 T_{s2} 处理的8.1% ($p < 0.05$)。

2.4 土壤无机氮及微生物生物量碳、氮含量

由图3a可见，经过4个生长季后， T_{s1} 处理中的

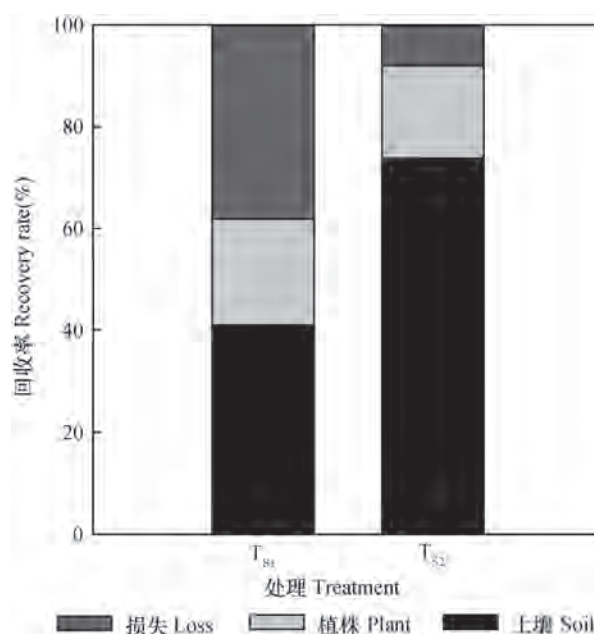


图2 不同处理秸秆氮素在土壤-植物中的回收率及损失率
Fig. 2 Accumulative recovery rate and loss rate of the nitrogen brought in with mulch in soil-plant system relative to treatment in the experiment

土壤无机氮总量 (0~60 cm) 达到111 kg hm^{-2} ，而在 T_{s2} 处理下，土壤无机氮总量 (0~60 cm) 为102 kg hm^{-2} 。可见，连续秸秆覆盖还田 (T_{s2} 处理) 在一定程度上降低了土壤无机氮总量。土壤无机氮的 ^{15}N 丰度在土壤剖面中 (0~20、20~40和40~60 cm) 均呈现出 T_{s1} 处理显著高于 T_{s2} 处理 ($p < 0.05$, 图3b)。此外，在 T_{s1} 处理中，秸秆

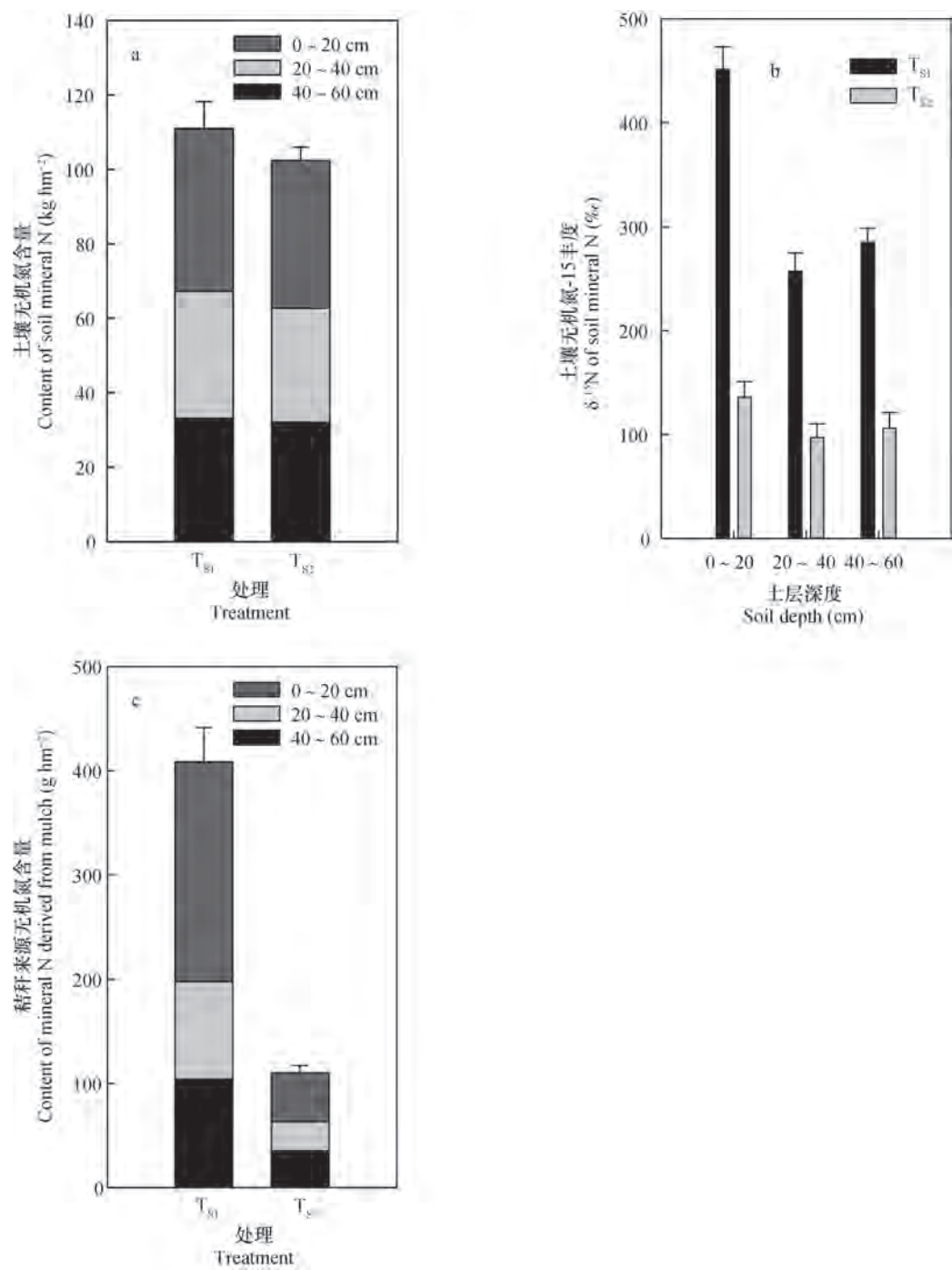


图3 不同处理土壤（0~60 cm）无机氮含量（a）、¹⁵N丰度（b）以及秸秆来源无机氮含量（c）
Fig. 3 Content of mineral N (a) and ¹⁵N abundance (b) in the soil (0~60 cm) and content of mineral N derived from mulch (c) in the soil profile relative to treatment

来源的无机氮在土壤中（0~60 cm）的总量达到 409 g hm⁻²，占土壤无机氮总量的0.37%；而在T_{S2}处理中，秸秆来源的无机氮总量仅为110 g hm⁻²，占土壤无机氮总量的0.11%（图3c）。

由图4a可见，经过4个生长季后，在T_{S1}处理下，土壤微生物生物量碳含量为228 mg kg⁻¹，而在

T_{S2}处理下达到241 mg kg⁻¹。与单次秸秆还田（T_{S1}处理）相比，连续秸秆还田（T_{S2}处理）在一定程度上提高了0~20 cm土层的土壤微生物生物量碳含量（5.3%）。在T_{S1}和T_{S2}处理下，土壤微生物生物量氮含量分别为29.1和31.6 mg kg⁻¹，T_{S2}处理较T_{S1}处理提高了8.6%（图4b）。

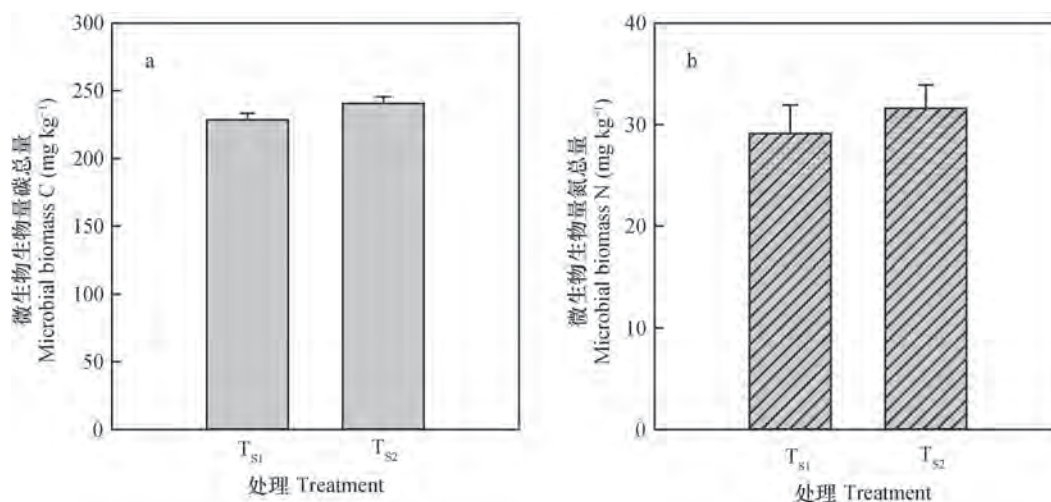


图4 不同处理0~20 cm土层的微生物生物量碳(a)和微生物生物量氮(b)

Fig. 4 Contents of microbial biomass C (a) and N (b) in the 0~20 cm soil layer relative to treatment

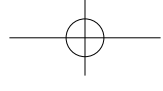
3 讨 论

武际等^[23]研究表明,连续秸秆还田对作物的增产效果随种植年限的推移越来越明显,例如,小麦和玉米季均在还田2年后表现出显著的增产效果。谭德水等^[24]在华北平原13年的秸秆覆盖试验中发现同样的规律,秸秆还田提高了小麦和玉米产量。而在本研究中,玉米籽粒和秸秆的累积产量和氮素吸收总量在单次和连续秸秆覆盖还田下差异均不显著。这可能是因为在东北地区秸秆的分解速率较低^[6],本研究只持续了4个生长季,因而与单次秸秆还田相比,连续秸秆还田对作物的增产效果不明显。随着单次还田秸秆的完全腐解,连续的秸秆还田对作物产量的影响会逐渐明显。

秸秆氮素作为输入农田土壤的重要有机氮源。与肥料氮素不同的是,绝大部分秸秆氮素均是以聚合物的形式存在,必须通过矿化作用释放出来后才能被作物吸收利用。在本研究中,经过4个生长季,秸秆氮素的作物累积利用率为18%~21%,高于在温度和降雨较高地区(热带和亚热带地区)的累积利用率(12%~16%)^[17, 25-27]。研究表明,秸秆分解和氮素矿化、吸收随着秸秆的质量和数量、气候条件(温度和降雨)和施用方式变化而变化^[12, 25, 28]。对于高碳氮比的作物秸秆(玉米、小麦和水稻秸秆)而言,在降雨量和气温均较低的地区,秸秆分解较慢、腐殖化周期较长。此外,秸秆覆盖还田不利于土壤微生物与秸秆接触,也在一定程度上降低秸秆的分解速率^[7, 18]。我们通过测

定秸秆的分解回收率发现,在经过1个生长季(约150天)后秸秆的分解率仅为25%。本研究结果表明,在中国东北地区,秸秆的表施和较低的温度和降雨量虽然延缓了秸秆养分的释放,反而有利于秸秆氮素的作物吸收利用,并提高了秸秆氮素的作物累积利用率。经过4个生长季后,第1年还田的秸秆基本完全分解。连续秸秆还田下初始还田秸秆氮素的作物累积利用率(18.2%)低于单次秸秆还田处理(20.9%)。这是因为连续的秸秆还田,提供了丰富的碳源和养分提高了微生物活性和生物量,从而增加了秸秆氮素的微生物固持(图4),而非后续秸秆的加入延迟了初始还田秸秆的分解矿化。

绝大部分的秸秆氮素从秸秆释放后积累在土壤中,作为重要的氮源供给作物利用和保持土壤氮素含量。在热带等地区的试验表明,秸秆氮素在土壤中的积累随着时间显著降低^[10, 17, 25-26]。然而,本研究中,在经过4个生长季后秸秆氮素在土壤中的回收率仍然保持较高水平,特别是在连续秸秆还田处理下。这表明在温带地区较低的秸秆分解速率也有利于秸秆氮素在土壤中的积累。由于秸秆覆盖还田,秸秆氮素在土壤表层的积累量显著高于较深土层。然而,在10~20 cm土层,秸秆氮素也有明显的积累,这表明秸秆氮素在土壤剖面发生了明显的垂直迁移。众所周知,在土壤中氮素的淋失迁移主要与可交换态的无机氮含量有关,特别是硝态氮^[23]。在单次秸秆还田下,由于缺少新鲜有机物料的持续供应,秸秆氮素的微生物固持作用减弱,而较高的无机氮素含量易于发生淋溶等形式损失,



因而导致了秸秆氮素在表层土壤的显著降低。而在有后续秸秆还田的情况下，初始还田的秸秆氮素在土壤剖面（0~20 cm）中维持在较高水平。与单次秸秆还田相比，连续秸秆还田显著降低了土壤剖面中初始还田秸秆来源无机氮的含量，而在一定程度上提高了微生物生物量碳和氮，这表明后续的秸秆还田和肥料的施用，在促进了秸秆的微生物降解的同时提高了秸秆氮素在土壤中的微生物固持^[29]。因此，在连续秸秆还田下大量的秸秆氮素以相当稳定的形态在表层土壤中积累。

在农田生态系统中，秸秆还田后，秸秆氮素的去向包括：后茬作物吸收利用、保持在土壤中以及发生淋溶和气态等途径损失^[25]。在本研究中没有直接测定秸秆氮素通过各途径的损失量，但是通过差减法计算的结果表明，秸秆氮素在经过4个生长季后的损失率较低（8.1%~38.6%），说明在本试验条件下覆盖还田的秸秆虽然具有较低的分解速率，但这在一定程度上降低了秸秆氮素的损失率。与单次秸秆还田相比，连续秸秆还田显著降低了初始还田秸秆氮素的损失率，从而提高了秸秆氮素在土壤-植物系统的总回收率。这些发现表明在温带农田生态系统中，免耕结合连续的秸秆覆盖还田可促进秸秆氮素在土壤中的积累，对提高和保持土壤氮素含量和稳定性具有重要的意义。

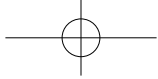
4 结 论

在我国东北地区，免耕覆盖还田下秸秆的分解速率较低。在本试验条件下，单次和连续秸秆覆盖还田对玉米籽粒、秸秆的累积产量及总氮素吸收量的影响差异不显著；但是单次秸秆还田显著提高了作物对秸秆氮素的累积利用率。与作物吸收利用相比，更多的秸秆氮素在释放后被保持在土壤中。在连续秸秆还田下，通过提高初始还田秸秆氮素在土壤中的微生物固持，从而降低了损失风险，最终提高其在土壤-植物系统的总回收率。

参 考 文 献

- [1] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87—91
Han L J, Yan Q j, Liu X Y, et al. Straw resources and their utilization in China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 87—91
- [2] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果. 应用生态学报, 2002, 13(5): 539—542
Wu Z J, Zhang H J, Xu G S, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 539—542
- [3] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48—51
Liu S P, Nie X T, Zhang H C, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 48—51
- [4] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕和秸秆还田对潮土酶活性及微生物量碳氮的影响. 土壤, 2013, 45(5): 894—898
Lu Y Q, Zhu A N, Zhang J B, et al. Effects of no-tillage and straw-return on soil enzyme activities and microbial biomass (In Chinese). Soils, 2013, 45(5): 894—898
- [5] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504—1510
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1504—1510
- [6] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析. 土壤学报, 2016, 53(1): 12—23
Wang J Z, Lu C A, Zhang W J, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: A meta-analysis (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 12—23
- [7] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响. 土壤学报, 2001, 38(1): 135—138
Li X J, Zhang Z G, Li Y X. Effects of soil depth on decay speed of straw (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 135—138
- [8] 闫德智, 王德建, 张刚, 等. ¹⁵N标记秸秆在太湖地区水稻土上的氮素矿化特征研究. 土壤学报, 2012, 49(1): 77—85
Yan D Z, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen mineralization of applied ¹⁵N labeled straw in paddy soils in the Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 77—85
- [9] 左红娟, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于¹⁵N华北平原冬

- 小麦肥料氮的去向研究. 中国农业科学, 2012, 45 (15): 3093—3099
- Zuo H J, Bai Y L, Lu Y L, et al. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat in North China Plain based on high abundance of ^{15}N (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (15): 3093—3099
- [10] Douchamps S, Frossard E, Bernasconi S M, et al. Nitrogen recoveries from organic amendments in crop and soil assessed by isotope techniques under tropical field conditions. *Plant and Soil*, 2011, 341: 179—192
- [11] Redin M, Recous S, Aita C, et al. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 65—75
- [12] Coppens F, Merckx R, Recous S. Impact of crop residue location on carbon and nitrogen distribution in soil and in water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (4): 570—582
- [13] Burgess M S, Mehuys G R, Madramootoo C A. Decomposition of grain-corn residues (*Zea mays* L.): A litterbag study under three tillage systems. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82 (2): 127—138
- [14] Burgess M S, Mehuys G R, Madramootoo C A. Nitrogen dynamics of decomposing corn residue components under three tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 (4): 1350—1358
- [15] Ibewiro B, Sanginga N, Vanlauwe B, et al. Transformations and recovery of residue and fertilizer nitrogen-15 in a sandy Lixisol of West Africa. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31: 261—269
- [16] 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. 中国农业科学, 2015, 48 (14): 2785—2795
- Huang T M, Zheng X F, Wang Z H. Nitrogen release of returned maize straw and its effects on loess n supply and nitrogen uptake by winter wheat in Guanzhong Plain (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (14): 2785—2795
- [17] Dourado-Neto D, Powlson D, Bakar R A, et al. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (1): 139—152
- [18] 匡恩俊, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 不同还田方式下玉米秸秆腐解规律的研究. 玉米科学, 2012, 20 (2): 99—101, 106
- Kuang E J, Chi F Q, Su Q R, et al. Decomposition characteristics of maize straws under different returning methods (In Chinese). *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20 (2): 99—101, 106
- [19] 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. 土壤学报, 1989, 26 (1): 64—71
- Xu X Y, Zhang Y M, Hu J S. Studies on the fate of nitrogen in wheat stubble applied on soil surface and incorporated with soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (1): 64—71
- [20] Lü H J, He H B, Zhao J S, et al. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. *Plant and Soil*, 2013, 373: 595—607
- [21] Hauck R D, Bremner J M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Advances in Agronomy*, 1976, 28: 219—266
- [22] 彭玲, 文昭, 安欣, 等. 果园生草对 ^{15}N 利用及土壤累积的影响. 土壤学报, 2015, 52 (4): 950—956
- Peng L, Wen Z, An X, et al. Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ^{15}N in apple orchard (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 950—956
- [23] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响. 中国农业科学, 2012, 45 (9): 1741—1749
- Wu J, Guo X S, Lu J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (9): 1741—1749
- [24] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 不同种植制度下长期施钾与秸秆还田对作物产量和土壤钾素的影响. 中国农业科学, 2007, 40 (1): 133—139
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (1): 133—139
- [25] Hubbard V C, Jordan D. Nitrogen recovery by corn from nitrogen-15 labeled wheat residues and intact roots and soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (5): 1405—1410
- [26] Kumar K, Goh K M, Scott W R, et al. Effects of N-15-labelled crop residues and management practices on subsequent winter wheat yields, nitrogen benefits and recovery under field conditions. *Journal of Agricultural Science*, 2001, 136: 35—53
- [27] Chen Y, Tang X, Yang S M, et al. Contributions of different N sources to crop N nutrition in a Chinese rice field. *Pedosphere*, 2010, 20 (2): 198—208
- [28] Lupwayi N Z, Clayton G W, O'Donovan J T, et al. Nitrogen release during decomposition of crop residues



- under conventional and zero tillage. Canadian Journal of Soil Science, 2006, 86 (1) : 11—19
- [29] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响. 水土保持学报, 2010, 24 (5) : 40—44, 62

Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (5) : 40—44, 62

Fate of Nitrogen Contained in Maize Stalk Mulch in No-tillage System

HU Guoqing^{1, 2} LIU Xiao^{1, 2} HE Hongbo^{1†} ZHANG Xudong^{1, 3}

(1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 National Field Observation and Research Station of Shenyang Agro-ecosystems, Shenyang 110016, China)

Abstract 【Objective】With increasing concerns about sustainability of agroecosystems, the practice of no-tillage in combination with crop straw/stalk mulching is getting widely used in China. In this scenario, large amounts of maize stalk were therefore left as mulch in the fields under a no-tillage cropping system. However, little is known about fate of the nitrogen (N) contained in the mulch of crop stalks in spite of the fact that they generally contain significant amounts of N. 【Method】Therefore, a four-year field-plot experiment was conducted to explore effects of mulching of maize stalk in fields in the agroecosystem of Northeast China on accumulative plant uptake, recovery and loss rate of the N contained in the maize stalk mulch over four experimental years. The experiment was designed to have two treatments. In Treatment T_{S1}, the plots were mulched with ¹⁵N-labelled maize stalk in the first year, and not with any in the following three years, while in Treatment T_{S2} the plots were mulched with ¹⁵N-labelled maize stalk in the first year, and with ordinary maize stalk in the following three years. 【Result】Results show that over the four experimental years, the two treatments did not vary much in accumulative yield of maize grain or stalk and total N uptake. However, in Treatment T_{S1} about 14.2% and 6.7% of the N in the mulch was recovered by maize grain and stalk, respectively, and significantly higher than that (12.4% and 5.8%, respectively) in Treatment T_{S2}. Compared to the accumulative amount of N recovered from the mulch by crop, more of the N in the mulch was retained in the soil, especially in the top soil layer in both treatments. About 40.9% and 73.8% of the N in the mulch was retained in the soil (0 ~ 60 cm) in residue form and about 38.6% and 8.1% lost in Treatments T_{S1} and T_{S2}, respectively. Compared to Treatment T_{S1}, Treatment T_{S2} was relatively higher in soil microbial biomass C and N, but lower in mineral N derived from the mulch, which indicates that continuously mulching the fields with crop stalk significantly increased the microbial retention rate of the N in the mulch, while decreasing the leaching risk of the N in the mulch in the soil-crop system. 【Conclusion】All the findings listed above suggest that long-term practice of no-tillage in combination with crop straw/stalk mulching can effectively enhance accumulation in the soil of the N brought in with mulching, which may have some significant implications for raising and maintaining the content and stability of soil N in crop fields.

Key words ¹⁵N-labelling; N in mulch; Stalk mulching; Soil-plant system

(责任编辑：陈德明)