

董姝含, 贺章咪, 王婉琦, 等. 土壤有机氮组分的年际变化及其对秸秆还田的响应. 应用生态学报, 2022, 33(11): 2963-2970
Dong S-H, He Z-M, Wang W-Q, et al. Interannual variation of soil organic nitrogen fractions and their responses to straw returning. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11): 2963-2970

土壤有机氮组分的年际变化及其对秸秆还田的响应

董姝含^{1,2} 贺章咪^{1,2} 王婉琦^{1,2} 张效琛^{1,2} 周 锋¹ 何红波^{1,3} 张旭东¹ 张 威^{1*}

(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辽宁省现代保护性耕作与生态农业重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要 阐明土壤有机氮组分的年际变化特征及其对秸秆还田的响应对合理调控土壤有机氮库和土壤可持续利用具有重要意义。在沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站进行田间微区试验(土壤类型为潮棕壤), 设置单施氮肥(200 kg N·hm⁻², 下同)、50%秸秆还田配施氮肥和100%秸秆还田配施氮肥3个处理, 采用Bremner酸水解法对试验第1、3、6、9年的土壤有机氮组分进行分级。结果表明: 氨基酸态氮含量随着耕作年限的增加逐渐提升, 提升幅度为39.8%; 酸解未知态氮含量提升幅度为10.8%, 且在第3年时最高; 土壤总氮和其他有机氮组分含量随耕作年限变化不大。相对容易矿化的酸解总氮占土壤总氮的比例随耕作年限的增加逐渐增加, 比较稳定的未酸解态氮占土壤总氮的比例随耕作年限的增加逐渐下降, 说明随着耕作年限的增加土壤氮素有效性提高, 土壤供氮能力增强。与单施氮肥相比, 加入秸秆提高了土壤总氮和各酸解态氮含量, 秸秆还田量越多, 提升效果越明显。秸秆还田对酸解态氮组分的影响主要发生在试验第6、9年, 增加的土壤总氮主要为氨基酸态氮和酸解未知态氮, 从而提高了土壤中酸解态氮占土壤总氮的比例。秸秆还田能够提升土壤氮库容, 提高土壤保氮供氮能力。

关键词 土壤有机氮组分; 秸秆还田; 年际变化; 施肥

Interannual variation of soil organic nitrogen fractions and its response to straw returning. DONG Shu-han^{1,2}, HE Zhang-mi^{1,2}, WANG Wan-qi^{1,2}, ZHANG Xiao-chen^{1,2}, ZHOU Feng¹, HE Hong-bo^{1,3}, ZHANG Xu-dong¹, ZHANG Wei^{1*} (¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Key Laboratory of Conservation Tillage & Ecological Agriculture, Liaoning Province, Shenyang 110016, China).

Abstract: Elucidating the interannual variation of soil organic nitrogen fractions and its response to straw returning is of great significance for rational regulation of soil organic nitrogen pool and sustainable soil utilization. We conducted a field microcosm experiment with typic hapludoll soil at the National Field Observation and Research Station of Shenyang Agroecosystems. Three treatments were set, including nitrogen fertilizer addition (200 kg N·hm⁻², the same in other treatments), nitrogen fertilizer addition with 50% straw return, and nitrogen fertilizer addition with 100% straw return. We classified soil organic nitrogen fractions in the 1st, 3rd, 6th, and 9th years of the experiment by using the Bremner acid hydrolysis method. The results showed that the content of amino acid nitrogen increased with the tillage years, with an increase rate of 39.8% compared with 1st year. The content of hydrolyzable unknown nitrogen increased by 10.8% compared with 1st year, which reached the highest in the 3rd year. The content of total soil nitrogen and other organic nitrogen fractions showed limited variation with tillage years. The proportion of hydrolyzable total nitrogen that is relatively easy to mineralize in the total soil nitrogen gradually increased with the tillage years, and that of relatively stable acid insoluble nitrogen to total soil nitrogen gradually decreased, indicating that soil nitrogen availability increased with the tillage years, which would facilitate the soil nitrogen supply capacity. Compared with the treatment without straw returning, adding straw improved soil total nitrogen and each hydrolyzable nitrogen contents, with such positive effect be stronger under the treatment with heavier straw returning. The effect of straw returning on hydrolyzable nitrogen fractions mainly occurred in the 6th and 9th years.

本文由黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090400)、国家自然科学基金项目(41877040, 42177324)、沈阳市科技计划项目(21-109-3-02)和辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200025)资助。

2022-01-17 收稿, 2022-09-06 接受。

* 通讯作者 E-mail: zhangw@iae.ac.cn

The components of soil total nitrogen that have been increased were mainly the amino acid nitrogen and hydrolyzed unknown nitrogen, resulting in increased proportion of hydrolyzable nitrogen. Straw returning could increase soil nitrogen pool and improve soil nitrogen conservation and supply capacity.

Key words: soil organic nitrogen fraction; straw returning; interannual variation; fertilizer application.

氮素是植物生长的必需营养物质,对作物产量具有重要影响,氮在土壤中的含量可以用来评价土壤肥力^[1]。有机氮是土壤氮素的主要存在形式,其含量超过土壤氮素的90%,土壤有机氮的周转变、赋存状态和化学形态均对土壤中氮的有效性有重要影响。土壤有机氮在影响土壤氮素肥力的同时,能够直接决定土壤的潜在保氮供氮能力,是土壤中矿质氮的源和库,也是土壤-植物系统氮素循环的核心控制因素^[2-4]。土壤有机氮库并非是一个天然的有机整体,包含了许多具有不同性质和来源的成分^[5]。根据 Bremner 在 1965 年提出的酸水解分级方法,将土壤有机氮组分分为氨基糖态氮、酸解氨态氮、氨基酸态氮、酸解未知态氮和未酸解态氮,其中前 4 种组分为酸解态氮。不同形态土壤有机氮组分在土壤氮素循环过程中的作用并不相同^[6],深入了解土壤中不同形态有机氮组分的变化,对认识土壤肥力演变和合理施用化学肥料十分重要。

在农田系统中,外源输入肥料中的氮是土壤主要的氮素来源,能够改变土壤氮的组成并影响作物生长。输入的肥料氮素在进入土壤后除一部分被植物吸收利用外,有相当大的比例以有机氮的形式存在于土壤中^[7]。施氮对土壤有机氮组分有一定的影响,但对不同形态的有机氮组分的影响并不相同。贾倩等^[8]发现,施用氮肥能够显著提高土壤酸解总氮含量,对未酸解态氮含量影响不大。施肥也改变了土壤各酸解态氮的含量及分布比例,其中对氨基酸态氮含量和分布比例的提升最大^[9]。而张玉树等^[10]研究表明,施氮提升了土壤全氮、有机氮含量和不同酸解态氮含量,其中酸解未知态氮含量增加最多,酸解氨态氮含量增加最少。可见,土壤中不同形态的有机氮组分对施肥的响应并不相同,可能受土壤类型、种植作物和气候环境等因素的影响^[11]。作物秸秆含有大量的营养元素,施入土壤后可以提升土壤有机质含量^[12],对土壤有机氮组分也有很大影响^[13]。作物秸秆提供的碳源促进了土壤氮素的生物转化,秸秆自身分解释放的有机氮也会进入土壤中^[14]。有研究表明,秸秆还田能够影响土壤总氮和各有机氮组分含量^[15]。王克鹏等^[16]研究表明,秸秆还田能够增加土壤中氨基糖态氮、氨基酸态氮、

酸解总氮的含量,但使酸解氨态氮含量降低。也有研究表明,秸秆还田可显著增加土壤中氨基酸态氮、酸解未知态氮和未酸解态氮含量^[17-18]。对当季条件下秸秆还田对土壤有机氮组分的研究表明,秸秆还田条件下土壤总氮和各酸解态氮组分含量均有所增加,土壤酸解态氮占土壤总氮的比例增加,未酸解态氮占土壤总氮的比例则降低^[2]。综上,施氮和秸秆还田处理均会对土壤有机氮组分产生一定影响,进而影响土壤供氮能力,但施氮对土壤有机氮库组分长期动态变化的影响及不同秸秆还田量对该过程的调控仍不清楚。深入研究长期施氮和秸秆还田如何通过影响土壤有机氮的化学形态及其存在状况来影响土壤的供氮能力,对合理施用氮肥、实现氮素高效利用和优化农田管理方式十分重要。因此,本研究通过 9 年的野外试验,研究单施氮肥、50% 玉米 (*Zea mays*) 秸秆还田配施氮肥和 100% 玉米秸秆还田配施氮肥处理对土壤有机氮组分动态变化的影响,以期科学施肥及提高肥料氮素利用率提供理论支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验在中国科学院沈阳农业生态国家野外科学观测研究站(41°32' N, 122°23' E)进行,该站建于 1987 年,地处下辽河平原,属于暖温带湿润-半湿润大陆性季风气候,雨热同季,四季分明。年平均气温 7~8 °C,年均降水量 650~700 mm,土壤类型为潮棕壤,免耕种植。土壤有机碳含量为 10.3 g·kg⁻¹,总氮含量为 1.0 g·kg⁻¹,有效氮含量为 109.3 mg·kg⁻¹,pH 为 6.4。

1.2 试验设计

试验设 3 个处理,分别为单施氮肥(T₀)、氮肥+50%秸秆(T₁)和氮肥+100%秸秆(T₂),每处理设置 3 个重复。试验于 2011 年开始,采用田间原位微区设计,每个微区的面积为 2.08 m²(1.6 m×1.3 m),采用 PVC 板将微区围起来,PVC 板地上部分为 15 cm,插入地下深度为 35 cm,各小区之间的距离为 2.5 m。试验作物为玉米,底肥施用采用条施的方式,肥料施用量为 50 kg N·hm⁻²、30 kg P·hm⁻²、58

kg K · hm⁻²; 在玉米生长期采用两次追肥的方式, 第一次追肥在拔节期进行, 追肥量为 100 kg N · hm⁻², 第二次追肥在吐丝期进行, 追肥量为 50 kg N · hm⁻²。玉米秸秆还田的数量为秸秆年平均产量的 50%(T₁) 和 100%(T₂), 秸秆长度约 10 cm, 在播种后一次性均匀覆盖于土壤表面。

1.3 土壤样品采集与测定

1.3.1 样品采集 于试验开始的第 1(2011 年)、3(2013 年)、6(2016 年)、9(2019 年) 年 9 月(玉米成熟期) 采集 0~10 cm 土壤样品。每个微区按照五点采样法进行采样, 土样混匀后去除可见的植株残体、石块, 过 2 mm 筛, 风干研磨后过 0.15 mm 筛, 测定各指标。

1.3.2 样品测定 土壤总氮含量采用元素分析仪(Elemental Analyzer, Model CN, Vario Macro Elemental Analyzer System, 德国) 进行测定。土壤氨基糖态氮含量用 6 mol · L⁻¹ 盐酸水解, 经纯化和糖脲乙酰酯衍生后采用气相色谱仪(GC-7890, Agilent, 美国) 进行测定^[19]。土壤氨基酸态氮含量用 6 mol · L⁻¹ 盐酸水解, 经纯化和柱前衍生后采用液相色谱仪进行测定^[20]。酸解氨态氮、未酸解氨态氮含量用 6 mol · L⁻¹ 盐酸水解, 经中和后采用氧化镁-蒸馏-硫酸标准液滴定法测定酸解氨态氮含量, 采用元素分析仪测定未酸解氨态氮含量^[21]。

1.4 数据计算

氨基糖(酸) 态氮总量 = ∑ 每种氨基糖(酸) 态氮含量测定值

$$\text{酸解氨态氮含量} = [c \times (V - V_0) \times M \times ts] / m \times 1000$$

式中: c 为硫酸标准液的浓度(mol · L⁻¹); V 为样品滴定硫酸标准液的体积(mL); V_0 为空白样品滴定硫酸标准液的体积(mL); M 为氮素的摩尔质量; ts 为分取倍数; m 为土壤样品的重量(g)。

酸解未知态氮 = 土壤总氮 - 氨基酸态氮 - 酸解氨态氮 - 未酸解氨态氮 - 氨基糖态氮

酸解总氮 = 氨基酸态氮 + 氨基糖态氮 + 酸解氨态氮 + 酸解未知态氮

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件对所有试验数据进行整理分析。采用重复测量方差分析及 LSD 法对土壤总氮和各有机氮组分进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$), 分别对酸解总氮与土壤总氮及各酸解态氮与土壤总氮做回归分析。使用 Origin 2021 软件作图。图表中数据为平均值 ± 标准误。

2 结果与分析

2.1 土壤总氮的年际变化

由表 1 可以看出, 经过 9 年的试验, 除 T₀ 处理土壤总氮含量变化不显著外, T₁ 和 T₂ 处理土壤总氮含量均显著增加, 试验第 9 年比第 1 年分别增加了 282.73 和 319.86 mg · kg⁻¹。各处理土壤总氮含量大小顺序为 T₂ > T₁ > T₀, 表明与单施氮肥相比, 秸秆还田配施氮肥处理有提高土壤总氮含量的趋势, 且秸秆还田量越多, 土壤总氮含量提升越多。

2.2 土壤酸解态氮的年际变化

2.2.1 各酸解态氮的年际变化 由图 1 可知, 在整个试验期内, 3 个处理各酸解态氮含量均呈现出一定的年际动态变化。T₀ 处理下, 氨基糖态氮含量变化不大, 范围为 55.93~61.95 mg · kg⁻¹; 秸秆还田处理下, 氨基糖态氮含量随时间增加而增加, 到第 6 年时显著高于第 1 年, T₁ 和 T₂ 处理氨基糖态氮含量范围分别为 55.62~83.13 和 57.44~95.97 mg · kg⁻¹, 9 年分别提升了 49.5% 和 67.1%。各处理间氨基糖态氮含量在试验第 1 年差异不大, 但在第 6 年和第 9 年时差异显著, 表现为 T₂ > T₁ > T₀。

在整个试验期内, T₀ 处理酸解氨态氮含量范围为 184.43~188.20 mg · kg⁻¹, 变化不显著; T₁ 处理下, 酸解氨态氮含量范围为 174.33~226.87 mg · kg⁻¹, 并随着耕作年限增加, 到第 9 年时显著高于第 1 年; T₂ 处理下, 酸解氨态氮含量范围为 198.67~272.59 mg · kg⁻¹, 随着耕作年限增加而逐渐增加, 且第 6 年和第 9 年显著高于第 1 年和第 3 年。在试验第 9 年, T₂ 处理酸解氨态氮含量显著高于 T₁ 和 T₀ 处理。

氨基酸态氮含量在 T₀、T₁ 和 T₂ 处理下均随耕作

表 1 不同处理土壤总氮的年际变化

Table 1 Interannual variation of soil total nitrogen under different treatments (mg · kg⁻¹)

处理 Treatment	第 1 年 1st year	第 3 年 3rd year	第 6 年 6th year	第 9 年 9th year
T ₀	935±15aA	1017±15aA	1041±52aB	1089±74aB
T ₁	963±26cA	1056±52bA	1156±77aAB	1245±128aAB
T ₂	994±38bA	1045±12bA	1245±20aA	1313±21aA

T₀: 单施氮肥 Single nitrogen fertilizer; T₁: 氮肥+50% 秸秆 Nitrogen fertilizer with 50% straw return; T₂: 氮肥+100% 秸秆 Nitrogen fertilizer with 100% straw return. 同行不同小写字母表示不同年份间差异显著, 同列不同大写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters in the same row indicated significant difference among different years, and different uppercase letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

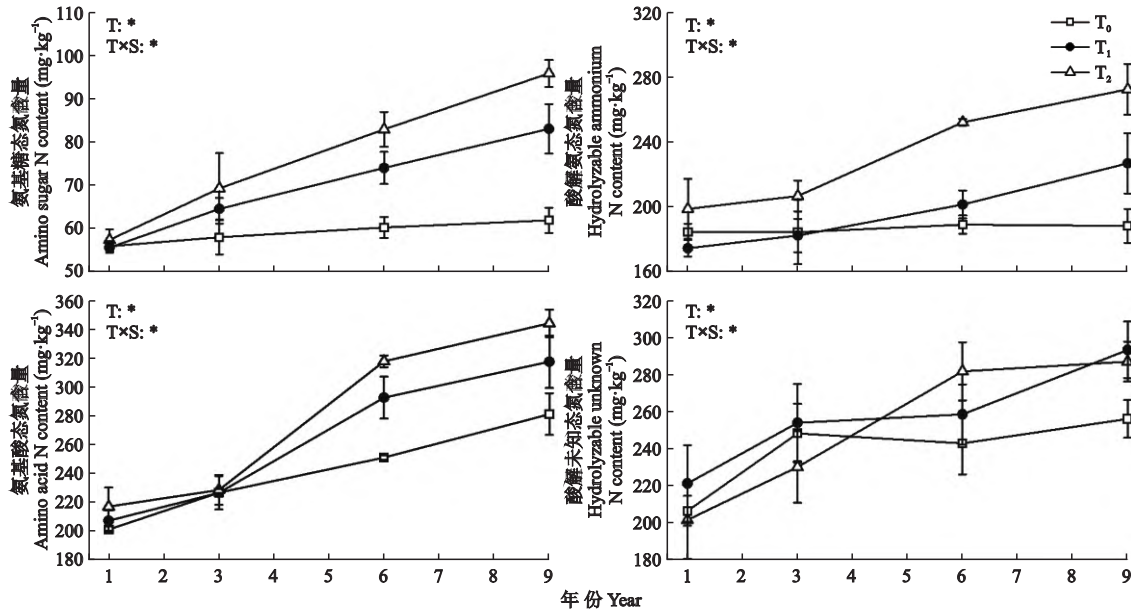


图 1 不同处理土壤各酸解态氮含量的年际变化

Fig.1 Interannual dynamics of different hydrolyzed nitrogen fractions in different treatments.

T₀: 单施氮肥 Single nitrogen fertilizer; T₁: 氮肥+50% 秸秆 Nitrogen fertilizer with 50% straw return; T₂: 氮肥+100% 秸秆 Nitrogen fertilizer with 100% straw return. T: 时间 Time; S: 秸秆还田 Straw return. * P<0.05; ns: P>0.05. 下同 The same below.

年限的增加而增加,其含量范围分别为 201.16~281.26、207.31~317.66 和 217.08~344.32 mg·kg⁻¹ 并且均在试验的第 6 年和第 9 年时显著高于第 1 年。在试验第 1 年和第 3 年时,单施氮肥处理和秸秆还田配施氮肥处理对氨基酸态氮含量影响不大,但到试验第 6 年和第 9 年,秸秆还田处理显著提升了氨基酸态氮含量,且秸秆还田量越多,提升效果越明显。

各处理酸解未知态氮含量在整个试验期内逐渐增加,到试验第 9 年显著提升,T₀、T₁ 和 T₂ 处理酸解未知态氮含量范围分别为 206.65~256.11、221.39~293.24 和 201.72~286.91 mg·kg⁻¹。在试验第 9 年,与单施氮肥处理相比,秸秆还田处理显著提升了土壤酸解未知态氮含量。

2.2.2 酸解总氮的年际变化 由图 2 可知,T₀、T₁ 和 T₂ 处理在整个试验期的酸解总氮含量范围分别为 648.17~787.53、658.65~920.90 和 674.92~999.79 mg·kg⁻¹,均占土壤全氮含量的 60% 以上,并且随耕作年限的增加而逐渐增加,试验第 9 年比第 1 年分别增加了 21.5%、39.8% 和 48.1%。经过 9 年田间试验,秸秆还田处理能够显著提升土壤酸解总氮含量,且秸秆还田量越高,提升效果越明显。

2.3 土壤未酸解态氮的年际变化

由图 3 可知,T₀、T₁ 和 T₂ 处理在整个试验期的未酸解态氮含量随时间变化不大,范围分别为 287.28~301.44、303.89~329.62 和 310.35~318.70 mg·kg⁻¹。

秸秆还田与否及秸秆还田量对未酸解态氮含量影响不大。

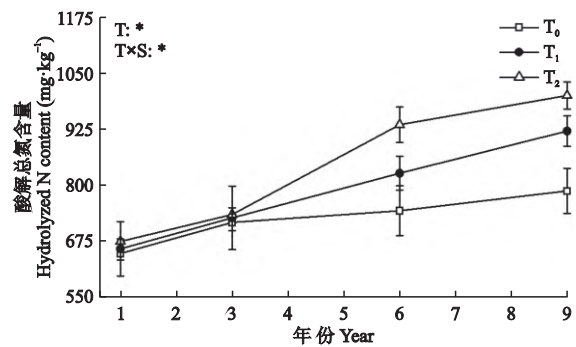


图 2 不同处理土壤酸解总氮含量的年际变化

Fig.2 Interannual dynamics of hydrolyzed nitrogen in different treatments.

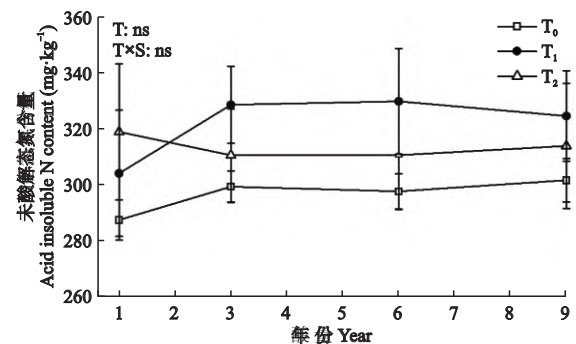


图 3 不同处理土壤未酸解态氮含量的年际变化

Fig.3 Interannual dynamics of acid insoluble organic nitrogen in different treatments.

2.4 各有机氮组分占土壤总氮比例的年际变化

由图 4 可知, T_0 、 T_1 和 T_2 处理酸解态氮占土壤总氮的比例分别为 69.3%~72.2%、68.4%~73.6% 和 68.0%~76.1%, 经过 9 年试验, 该比例随着耕作年限的增加而增加, 其中, T_0 增加的幅度最小, T_2 增加的幅度最大。未酸解态氮占土壤全氮的比例与酸解态氮相反。氨基糖态氮占土壤总氮的比例是几种组分中最低的, T_0 、 T_1 和 T_2 处理下分别为 5.7%~6.0%、5.8%~6.7% 和 5.8%~7.3%; T_0 处理下氨基糖态氮占土壤总氮的比例在整个试验期内变化不大, 秸秆还田处理下氨基糖态氮占土壤总氮的比例随着耕作年限的增加而逐渐升高, 且秸秆还田量越多, 该比例提高越多, 到试验第 9 年 T_1 和 T_2 处理的氨基糖态氮比例比 T_0 处理分别提高了 17.1% 和 27.8%。酸解氨态氮占土壤全氮的比例在 T_0 、 T_1 和 T_2 处理下分别为 17.3%~18.2%、17.2%~18.3% 和 19.8%~20.8%, 秸秆

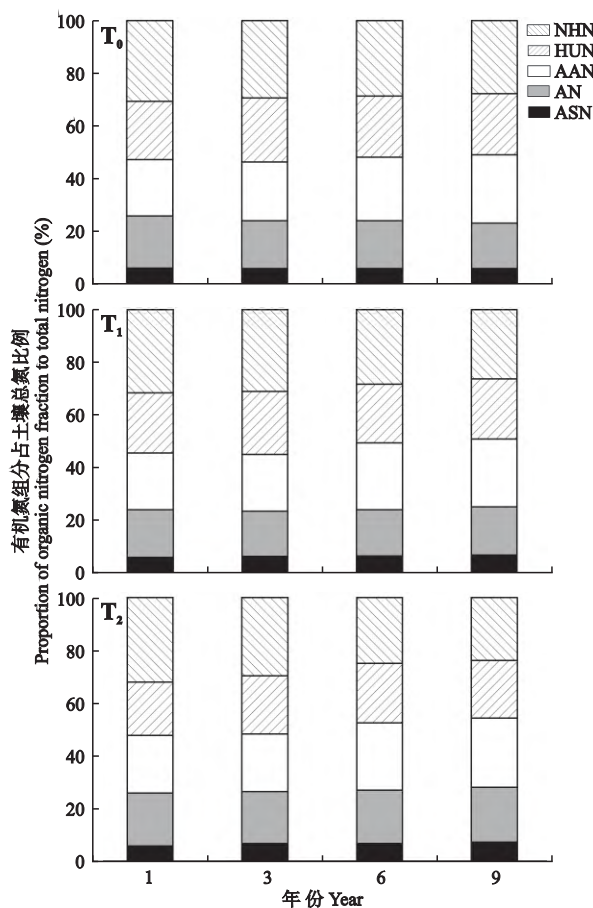


图 4 各有机氮组分占土壤总氮比例的年际变化

Fig.4 Interannual variation of the proportion of organic nitrogen fraction to total nitrogen.

NHN: 未酸解态氮 No hydrolyzed nitrogen; HUN: 酸解未知态氮 Hydrolyzable unknown nitrogen; AAN: 氨基酸态氮 Amino acid nitrogen; AN: 酸解氨态氮 Hydrolyzable ammonium nitrogen; ASN: 氨基糖态氮 Amino sugar nitrogen. 下同 The same below.

还田处理能够提高酸解氨态氮占土壤总氮的比例, 到试验第 9 年 T_1 和 T_2 处理的酸解氨态氮比例比 T_0 处理分别提高了 5.5% 和 20.0%。 T_0 、 T_1 和 T_2 处理氨基酸态氮占土壤全氮的比例分别为 21.5%~25.9%、21.6%~25.8 和 21.9~26.2%, 均随着耕作年限的增加而逐渐增加。 秸秆还田处理对土壤氨基酸态氮占土壤总氮的比例影响不大。 T_0 、 T_1 和 T_2 处理酸解未知态氮占土壤全氮的比例分别为 22.1%~24.4%、22.3%~24.0% 和 20.3~22.3%, 在整个试验期内变化不大。

2.5 各有机氮组分对土壤总氮变化的贡献

土壤总氮与酸解态氮的回归分析表明(图 5), 土壤总氮含量提高的部分主要体现在酸解氮组分中。虽然在整个试验期 T_0 处理土壤总氮含量有所提升, 但差异不显著, 土壤增加的这部分总氮有 90.8% 为酸解态氮; 在秸秆还田处理(T_1 和 T_2) 下, 酸解总氮对土壤总氮提高的贡献较 T_0 均有增加, 秸秆还田量越多, 酸解总氮的贡献越大。

由于土壤总氮增加量主要是酸解态氮, 所以进

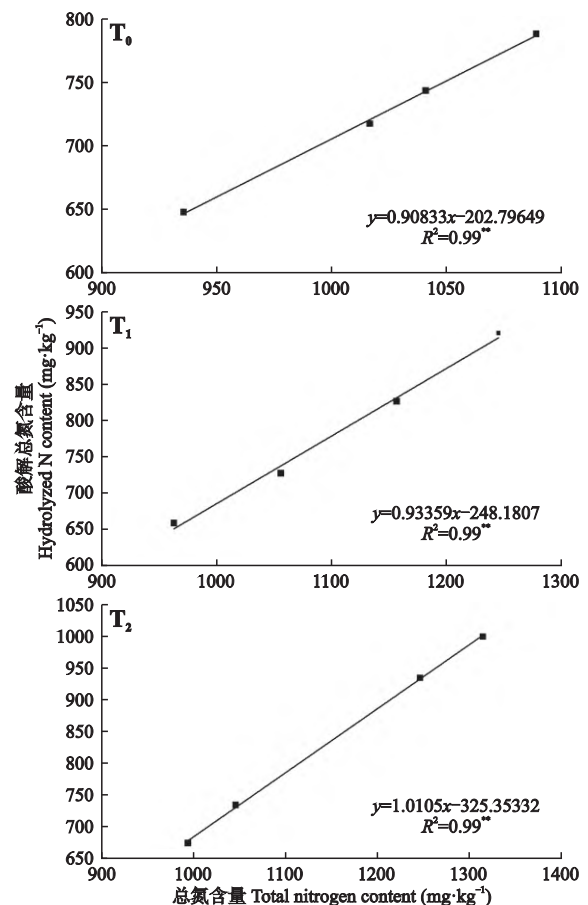


图 5 土壤总氮含量与酸解总氮含量的关系

Fig.5 Relationship between soil total nitrogen content and hydrolyzed nitrogen content.

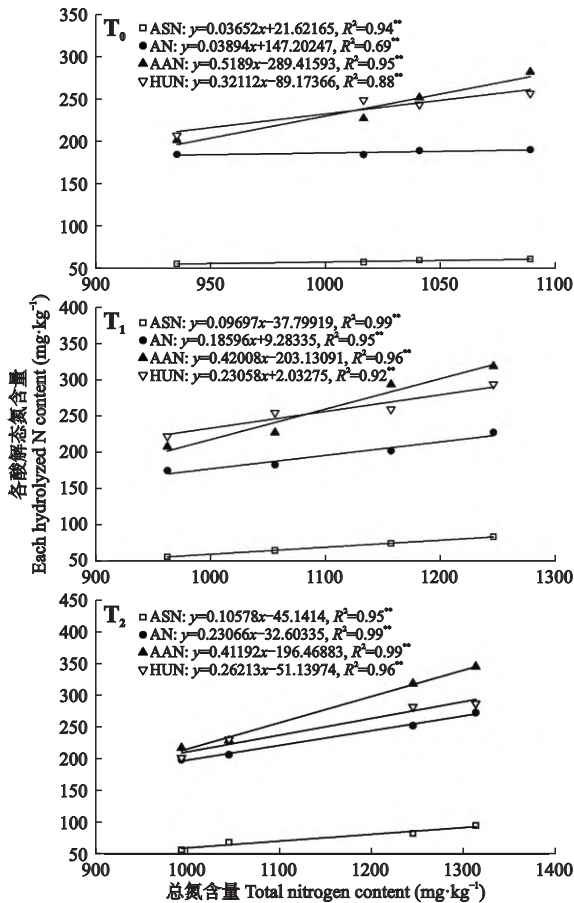


图 6 土壤总氮含量与各酸解态氮含量的关系

Fig. 6 Relationships between soil total nitrogen content and different hydrolyzed nitrogen contents.

一步分析各酸解氮组分与土壤总氮的关系(图 6)。在 T_0 、 T_1 和 T_2 处理下,土壤增加的总氮中各有机氮组分的贡献均表现为氨基酸态氮>酸解未知态氮>酸解氨态氮>氨基糖态氮。 T_0 、 T_1 和 T_2 处理土壤增加的总氮中氨基糖态氮分别贡献了 3.7%、9.7% 和 10.6%,酸解氨态氮分别贡献了 3.9%、18.6% 和 23.1%。秸秆还田处理比 T_0 提高了土壤增加的总氮中氨基糖态氮和酸解氨态氮的贡献,且秸秆还田量越高,提升越大。 T_0 、 T_1 和 T_2 处理土壤增加的总氮中氨基酸态氮分别贡献了 51.9%、42.0% 和 41.2%,酸解未知态氮分别贡献了 32.1%、23.1% 和 26.2%。

3 讨 论

3.1 土壤中有机氮组分的年际变化

在单施氮肥(T_0)处理下,土壤有机氮组分呈现出一定的年际动态变化。氨基糖态氮含量是几种有机氮组分中最低的,并在整个试验期内变化不显著,氨基糖态氮占土壤总氮的比例在整个试验期内变化

也不大,说明单施氮肥对氨基糖态氮的影响不大,这与其他研究结果一致^[22-23]。这可能是因为氨基糖是土壤微生物细胞壁残留物,主要成分为氨基葡萄糖、氨基半乳糖和胞壁酸,在土壤中有一定的稳定性。酸解氨态氮含量在整个试验期变化不显著,说明酸解氨态氮在单施氮肥处理下能保持平衡状态,这与张玉树等^[24]和王克鹏等^[25]的研究结果相同。这可能是因为酸解氨态氮是土壤氮素的临时库,肥料氮素施入土壤后,可以快速固定于酸解氨态氮中,而酸解氨态氮是土壤中主要的有效态氮,可以直接被当季作物吸收利用^[6],比较活跃,因此其能够达到一个基本平衡的状态。研究表明,氨基酸态氮是土壤氮最主要的矿化源^[26],是植物和微生物对土壤有效氮吸收的主要来源,可作为土壤供氮潜力的重要表征^[6]。本研究表明,氨基酸态氮含量及其占土壤总氮的比例均随着耕作年限的增加逐渐增加,表明随着耕作年限的增加,土壤氮素逐渐在氨基酸态氮中富集,氨基酸态氮的储存作用逐渐增强,土壤的供氮潜力提高,这与前人研究结果相同^[27]。主要是因为施肥能够同时为微生物和作物提供营养物质,一方面促进作物的生长发育,得到更多的根系分泌物,另一方面又为微生物提供营养物质,加速了微生物的生长繁殖,使土壤中的微生物量增加^[28],而氨基酸与土壤微生物代谢活动联系紧密,施入的肥料氮素可能更多地被微生物利用并以氨基酸态氮的形式存在于土壤中。在单施氮肥处理下,酸解未知态氮含量随着耕作年限的增加逐渐升高,这与他人研究结果一致^[11]。酸解未知态氮由杂环态氮(N-苯氧基氨基酸、非 α -氨基酸氮和嘧啶、嘌呤等)、土壤腐殖质化过程的产物和部分酸解未释放的固定态铵等生物有效性较低的物质组成,是土壤酸解有机氮库中较难矿化的组分,因此容易在土壤中积累^[6, 29-30]。酸解态氮是土壤总氮的主体,施肥明显提升了土壤中酸解总氮的含量及其占土壤总氮的比例,并且试验的前 3 年对酸解总氮的提升作用更明显,而未酸解态氮由于化学结构稳定,不易被矿化^[31-32],其含量在整个试验期内变化不大,占土壤总氮的比例逐渐下降。施入的肥料更多地固存于酸解氮组分中,尤其是氨基酸态氮和酸解未知态氮中,有利于肥料氮素在土壤中的保持和植物的吸收利用,而未酸解态氮占土壤总氮的比例降低也可增加土壤氮素的矿化速率^[10]。因此,在试验期内随着耕作年限的增加土壤氮素有效性提高,土壤的供氮能力逐渐增强,这与马芳霞等^[17]的研究结果一致。

3.2 秸秆还田对土壤中有机氮组分的影响

整体来讲, 秸秆还田处理除对比较稳定的未酸解态氮含量影响不大外, 能够提高土壤总氮、酸解总氮、各酸解态氮含量; 并且秸秆还田量越多, 土壤总氮含量提升越多, 说明秸秆还田能够提升土壤的氮库容和供氮能力, 这与一些研究结果相同^[12, 33]。这可能是由于施入秸秆的 C/N 很高(60:1~70:1), 在降解的过程中, 一方面产生了许多可利用的小分子物质, 为土壤微生物提供碳源和能源^[34], 使微生物残留物(氨基酸态氮和氨基糖态氮)在土壤中积累, 另一方面植物残体也会进入到土壤中进行转化, 增加了土壤氮库容和其他有机氮组分含量^[35]。从时间动态上看, 秸秆还田对酸解有机氮组分的影响主要在试验后期, 即在试验的第6年和第9年, 这说明在秸秆还田处理约6年后更有利于土壤有机氮组分在土壤中的保持, 能更好地起到活化氮素并促进其转化的作用。从各有机氮组分占土壤总氮的比例来看, 秸秆还田处理可提高土壤中氨基糖态氮、酸解氨态氮占土壤总氮的比例, 尤其是氨基糖态氮占土壤总氮的比例提升最多, 高量秸秆还田下这种提升作用更明显, 而对氨基酸态氮和酸解未知态氮占土壤总氮的比例影响不大, 说明秸秆还田处理对氨基糖态氮比其他有机氮组分作用更强, 这与前人研究结果一致^[17]。酸解氨态氮是土壤中主要的可直接供当季作物吸收利用的有效态氮, 可作为土壤供氮潜力的表征之一^[6]。土壤氨基糖是土壤有机氮库的重要组成部分之一, 在土壤中具有较高的稳定性。尽管在土壤中氨基糖的含氮量不到土壤氮含量的1/10^[4], 但是其可以作为土壤微生物残留物的标识物, 与土壤碳、氮供应关系密切^[36-37], 所以了解土壤氨基糖态氮的变化有利于了解土壤氮素的微生物转化循环过程。秸秆还田处理下土壤提升的总氮在氨基糖态氮中积累较多, 说明微生物在分解秸秆过程中利用秸秆中的养分进行生长代谢, 导致土壤微生物量增加, 进而促进土壤微生物对氮素的固持和转化^[38]。

总体来看, 秸秆还田处理下土壤中酸解总氮占土壤总氮的比例逐渐提升, 未酸解态氮占土壤总氮的比例逐年下降, 而酸解态氮更容易被植物吸收利用, 说明秸秆还田处理可以促进未酸解态氮向有效态氮转化, 增加土壤活性有机氮库和土壤氮素矿化能力。

参考文献

[1] Ta TC, Paris MA, Dowall FDH. Evaluation of ¹⁵N

- methods to measure nitrogen transfer from alfalfa to companion timothy. *Plant and Soil*, 1989, **114**: 243-247
- [2] 董姝含, 吕慧捷, 周锋, 等. 玉米土壤有机氮组分的生长季动态变化及其对当季和长期秸秆还田的响应. *生态学杂志*, 2022, **41**(1): 73-80
- [3] Schulten HR, Schnitzer M. The chemistry of soil organic nitrogen: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **26**: 1-15
- [4] Stevenson FJ. Organic forms of soil nitrogen [EB/OL]. (1982-01-01) [2022-01-16]. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr22.c3>
- [5] Olk DC. Organic forms of nitrogen// Bremner JM, ed. *Methods of Soil Analysis*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1965: 1238-1255
- [6] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展. *土壤通报*, 2018, **49**(5): 1240-1246
- [7] Bol R, Ostle NJ, Petzke KJ, et al. Amino acid ¹⁵N in long-term bare fallow soils: Influence of annual N fertilizer and manure applications. *European Journal of Soil Science*, 2008, **59**: 617-629
- [8] 贾倩, 廖世鹏, 卜容燕, 等. 不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响. *土壤学报*, 2017, **54**(6): 1547-1558
- [9] Durani A, Brar BS, Dheri GS. Soil nitrogen fractions in relation to rice-wheat productivity: Effects of long-term application of mineral fertilizers and organic manures. *Journal of Crop Improvement*, 2016, **30**: 399-420
- [10] 张玉树, 丁洪, 王飞, 等. 长期施用不同肥料的土壤有机氮组分变化特征. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(10): 1981-1986
- [11] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响. *中国农业科学*, 2020, **53**(12): 2423-2434
- [12] 王学敏, 刘兴, 郝丽英, 等. 秸秆还田结合氮肥减施对玉米产量和土壤性质的影响. *生态学杂志*, 2020, **39**(2): 507-516
- [13] 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响. *中国农业科学*, 2004, **37**(6): 859-864
- [14] Liu X, Zhou F, Hu GQ, et al. Dynamic contribution of microbial residues to soil organic matter accumulation influenced by maize straw mulching. *Geoderma*, 2019, **333**: 35-42
- [15] 张世汉, 武均, 张仁陟, 等. 不同氮水平下秸秆-生物质炭添加对旱作农田土壤酸解有机氮组分的影响. *干旱地区农业研究*, 2020, **38**(1): 92-100
- [16] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 等. 长期免耕和秸秆覆盖下黄土高原旱作土壤不同粒级复合体中酸解有机氮含量及分配比例变化. *植物营养与肥料学报*, 2016, **22**(3): 659-666
- [17] 马芳霞, 王忆芸, 燕鹏, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤有机氮组分的影响. *生态环境学报*, 2018, **27**(8): 1459-1465
- [18] 肖巧琳, 罗建新, 杨琼. 烟稻轮作中稻草还田对土壤有机氮各组分的影响. *土壤*, 2011, **43**(2): 167-173
- [19] Zhang XD, Amelung W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine,

- and galactosamine in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 1201–1206
- [20] He HB, Zhang W, Zhang XD, *et al.* Temporal responses of soil microorganisms to substrate addition as indicated by amino sugar differentiation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 1155–1161
- [21] Lv HJ, He HB, Zhao JS, *et al.* Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. *Plant and Soil*, 2013, **373**: 595–607
- [22] 郝晓晖, 肖宏宇, 苏以荣, 等. 长期不同施肥稻田土壤的氮素形态及矿化作用特征. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2007, **33**(5): 544–550
- [23] Xu YC, Shen QR, Ran W. Content and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization. *Chemosphere*, 2003, **50**: 739–745
- [24] 张玉树, 张金波, 朱同彬, 等. 不同种植年限果园土壤有机氮组分变化特征. *生态学杂志*, 2015, **34**(5): 1229–1233
- [25] 王克鹏, 张仁陟, 索东让. 长期施肥对河西灌漠土有机氮组分的影响. *生态环境学报*, 2008, **40**(5): 1092–1097
- [26] Li LL, Li ST. Nitrogen mineralization from animal manures and its relation to organic N fractions. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**: 2040–2048
- [27] Amelung W, Brodowski S, Sandhage-Hofmann A, *et al.* Combining biomarker with stable isotope analyses for assessing the transformation and turnover of soil organic matter. *Advances in Agronomy*, 2008, **100**: 155–250
- [28] 郭永盛, 李俊华, 李鲁华, 等. 施氮肥对荒漠草原土壤微生物种群及微生物量的影响. *新疆农业科学*, 2011, **48**(1): 79–85
- [29] 彭令发, 郝明德, 来璐. 长期施肥对土壤有机氮影响研究. I. 氮肥及其配施下土壤有机氮组分变化. *水土保持研究*, 2003, **10**(1): 53–54
- [30] Kelley KR, Stevenson FJ. Forms and nature of organic N in soil. *Fertilizer Research*, 1995, **42**: 1–11
- [31] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分割面分布的变化特征. *中国农业科学*, 2011, **44**(24): 5021–5030
- [32] Rovira P, Vallejo VR. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, **107**: 109–141
- [33] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural $\delta^{15}\text{N}$ abundance measurement. *Nature*, 1983, **303**: 685–687
- [34] Chen J, Carrillo Y, Pendall E, *et al.* Soil microbes compete strongly with plants for soil inorganic and amino acid nitrogen in a semiarid grassland exposed to elevated CO_2 and warming. *Ecosystems*, 2015, **18**: 867–880
- [35] 刘肖. 肥料氮素在土壤-植物系统中的累积动态及微生物固持机制研究. 博士论文. 北京: 中国科学院大学, 2015
- [36] Amelung W, Zhang XD. Determination of amino acid enantiomers in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 553–562
- [37] Wang JS, Stewart JR, Khan SA, *et al.* Elevated amino sugar nitrogen concentrations in soils: A potential method for assessing N fertility enhancement by actinorhizal plants. *Symbiosis*, 2010, **50**: 71–76
- [38] 胡国庆. 秸秆覆盖还田下不同来源氮素的去向及其微生物转化过程. 博士论文. 北京: 中国科学院大学, 2015

作者简介 董姝含, 女, 1996年生, 博士研究生. 主要从事土壤氮素转化过程研究. E-mail: dongshuhan18@mails.ucas.ac.cn

责任编辑 张凤丽