

东北黑土氨基糖的矿化动态及其对外源物质添加的响应*

张 威¹ 何红波¹ 解宏图¹ 白 震¹ 张旭东^{1,2,*}

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; ² 沈阳农田生态系统国家野外研究站, 沈阳 110016)

摘 要 采用间歇淋洗好气培养法研究了东北黑土中3种不同微生物来源氨基糖(氨基葡萄糖、胞壁酸和氨基半乳糖)的矿化动态以及对葡萄糖添加和葡萄糖与氮肥配施的响应. 结果表明: 土壤中不同种类的氨基糖具有不同的矿化特征. 培养期间胞壁酸含量减少 25.4% 而氨基葡萄糖含量降低 7.1%, 表明细菌来源的胞壁酸在土壤中的矿化速率快于真菌来源的氨基葡萄糖, 但氨基葡萄糖的矿化数量($68.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于胞壁酸($15.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 葡萄糖添加以及葡萄糖与氮肥配施均显著提高了土壤中氨基葡萄糖和胞壁酸的含量, 但两种处理的影响有所不同. 相比之下, 氨基半乳糖在土壤中矿化较慢, 并且受外源物质的影响较小, 表现出较高的稳定性.

关键词 氨基糖 矿化 葡萄糖 氮添加 黑土

文章编号 1001-9332(2010)10-2593-06 **中图分类号** S154.2 **文献标识码** A

Amino sugars mineralization and its responses to exogenous substances in black soil of Northeast China. ZHANG Wei¹, HE Hong-bo¹, XIE Hong-tu¹, BAI Zhen¹, ZHANG Xu-dong^{1,2} (¹Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²National Field Research Station of Shenyang Agroecosystems, Shenyang 110016, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(10): 2593–2598.

Abstract: By the method of intermittent leaching aerobic incubation, this paper studied the mineralization of three kinds of microbes-derived amino sugar (glucosamine, muramic acid, and galactosamine) in black soil of Northeast China, and the responses to glucose addition and glucose plus nitrogen amendment. The mineralization of the amino sugars was compound-specific. During incubation period, the content of muramic acid decreased by 25.4%, while that of glucosamine decreased by 7.1%, suggesting that bacteria-derived muramic acid was more inclined to be mineralized, compared with fungi-originated glucosamine. However, the mineralized amount of glucosamine ($68.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) was greater than that of muramic acid ($15.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Both glucose addition and glucose plus nitrogen amendment improved the contents of glucosamine and muramic acid significantly, but the effect varied. The mineralization of galactosamine was much slower, and less affected by exogenous substances addition, indicating that galactosamine was more stable in test soil.

Key words: amino sugar; mineralization; glucose; nitrogen supply; black soil.

东北地区是我国最重要的粮食生产基地之一. 然而, 随着东北地区黑土的垦殖与耕作, 土壤有机碳储量锐减, 土壤质量退化, 进而表现为土壤对氮素养

分的调控能力减退, 最终导致氮肥利用率下降, 并造成严重的环境污染问题^[1]. 氮素损失已经成为制约东北地区农业高产高效和可持续发展的重要因素之一. 国内外大量研究证实, 即使在施用大量氮肥的情况下, 作物吸收的氮素至少有 50% 以上来自土壤^[2–3]. 土壤供氮的实质是土壤氮素的矿化. 残留并在土壤中积累起来的有机氮的矿化和分解是土壤供

* 国家自然科学基金项目(40901143)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118607)和中国科学院陆地生态过程重点实验室基金项目(08ZDS151SS)资助.

** 通讯作者. E-mail: xdzhang@iae.ac.cn

2010-03-13 收稿, 2010-07-23 接受.

氮的主要来源. 因此, 调控土壤有机氮的矿化是减少氮素损失并提高氮素利用率的关键.

在土壤中, 氨基糖占土壤有机氮的 5% ~ 10%, 是土壤活性有机氮的重要组成部分, 也是土壤矿质态氮的主要来源之一^[4]. 土壤氨基糖主要来源于微生物^[5-6], 是土壤微生物细胞壁的组成物质, 其作为土壤微生物标识物的作用已被很多学者认可^[7-11]. 目前, 土壤中有 4 种氨基糖可以被定量化, 它们分别是氨基葡萄糖 (GluN)、胞壁酸 (MurN)、氨基半乳糖 (GalN) 和氨基甘露糖 (ManN)^[6]. 其中氨基葡萄糖主要来源于真菌, 是真菌几丁质 (chitin) 的唯一成分和脱乙酰几丁质 (chitosan) 的主要成分; 胞壁酸的唯一来源是细菌, 它是细菌中脂多糖 (lipopolysaccharides) 和细胞壁中肽聚糖 (peptidoglycan) 的成分; 氨基半乳糖的来源不很明确, 一般认为其主要是由细菌合成; 氨基甘露糖的来源不明确, 且在土壤中的含量极低, 与前 3 种氨基糖相比其在土壤中的研究较少^[6, 12-14]. 由于氨基糖的微生物异源性, 研究土壤中氨基糖的矿化对于研究土壤有机氮素的矿化具有微生物学指示作用. 然而, 目前关于土壤中氨基糖矿化方面的研究还鲜有报道. 此外, 有关东北黑土有机氮矿化调控方面的研究还较少. 因此, 本文将氨基糖的矿化及其微生物学意义相结合, 以东北黑土为研究对象, 采用 Stanford 和 Smith^[15] 的间歇好气矿化培养法, 探讨外加碳源葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施对土壤氨基糖矿化的调控作用, 阐明不同微生物来源氨基糖的矿化特征, 以期为研究减少土壤氮素损失、提高氮肥利用率的有效措施和实用方法提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试土壤为黑土 (0 ~ 20 cm), 采自吉林省公主岭市国家黑土监测基地, 按照“z”形采集 5 ~ 7 点混合样. 采样时间为 2006 年春季, 土壤样品在室温下风干, 过 2 mm 筛, 其基本理化性质为: pH (H₂O) 6.07, 有机碳 15.56 g · kg⁻¹, 全氮 1.47 g · kg⁻¹, C/N 10.59.

本试验采用 Stanford 和 Smith^[15] 的间歇淋洗好气矿化培养法, 称取 50 g 风干土样和等量的石英砂充分混匀, 移入预先装有 20 g 石英砂的 G3 级 100 ml 砂滤漏斗内, 在每个漏斗表面均匀撒入 20 g 石英砂, 避免淋洗时破坏土壤结构. 然后置于恒温培养箱中, 恒温控湿培养, 温度控制在 30 °C, 用称量法

定期补水, 使水分保持在风干土质量的 20%. 试验共设 3 个处理, 分别为: 空白对照 (CK), 单施葡萄糖 (Glu), 葡萄糖 + (NH₄)₂SO₄ 配施 (Glu+N) 处理. 按常规田间施氮量的最高值加入氮肥, 并使外源物质 C/N 为 10, 则 (NH₄)₂SO₄ 的加入量为 0.1 mg N · g⁻¹ 土, 葡萄糖的加入量为 1.0 mg C · g⁻¹ 土, 每个处理 3 个重复, 在培养开始和每次淋洗之后, 根据处理设计向土壤中加入上述含量的葡萄糖和 (NH₄)₂SO₄. 分别于培养的第 0、7、14、28、42、56、84、112、154、210 天, 用 100 ml 0.01 mol · L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液淋洗, 然后用 25 ml 的无氮营养液 (0.002 mol · L⁻¹ 硫酸钙、0.002 mol · L⁻¹ 硫酸镁、0.005 mol · L⁻¹ 磷酸二氢钙、0.0025 mol · L⁻¹ 硫酸钾) 淋洗, 多余水分在 60 cm 汞柱负压下抽去. 并分别在上述时间进行采样, 采集后的土壤样品风干后, 过 60 目筛, 用于土壤氨基糖的测定.

1.2 测定方法

土壤氨基糖采用 Zhang 和 Amelung^[6] 的糖脲乙酰酯衍生气相色谱法进行测定. 主要操作步骤为: 土壤样品用 10 ml 6 mol · L⁻¹ HCl 在 105 °C 水解 8 h, 冷却至室温后, 加入 100 μg 肌醇溶液 (内标), 振荡摇匀后过滤. 滤液用旋转蒸发仪蒸干, 残余物溶解于蒸馏水中, 并用 KOH 调 pH 为 6.6 ~ 6.8, 然后以 2000 × g · min⁻¹ 离心 10 min. 上清液用冷冻干燥仪冻干, 残留的固体物质用 3 ml 无水甲醇溶解, 再次离心 10 min. 将上清液转移到 5 ml 衍生瓶中, 用 N₂ 在 45 °C 下吹干后, 加入 1 ml 水, 摇匀后再次进行 8 h 以上冷冻干燥, 然后进行衍生. 将 300 μl 的衍生试剂 (4 : 1 的吡啶-甲醇溶液, 含有 32 mg · ml⁻¹ 盐酸羟胺和 40 mg · ml⁻¹ 4-二甲基氨基吡啶) 加入到上述衍生瓶中, 加盖密封, 在 75 °C ~ 80 °C 条件下加热 30 ~ 35 min, 其间振荡数次. 冷却至室温后, 加入 1 ml 乙酸酐, 密封再次加热 20 min. 冷却后加入 1.5 ml 二氯甲烷以萃取氨基糖的衍生物. 过量的衍生试剂可用 1 ml 1 mol · L⁻¹ HCl 和蒸馏水洗除并弃去水相部分, 剩余的有机相在 45 °C 下用 N₂ 吹干后, 溶于 200 μl 的乙酸乙酯-正己烷混合溶剂 (v/v = 1 : 1) 中, 然后转移至色谱进样瓶中, 进行气相色谱测定 (GC-6890, Agilent, USA; HP-5 毛细管色谱柱 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 色谱条件为: 初始温度 120 °C, 保持 4 min, 以 10 °C · min⁻¹ 升温至 230 °C, 再以 5 °C · min⁻¹ 升温至 250 °C, 保持 4 min, 再以 40 °C · min⁻¹ 升温至 300 °C, 保持 5 min. 高纯度 N₂ 为载气, 流速为 0.8 ml · min⁻¹, 进样量为 1 μl, 分流

比为10 : 1. 进样口温度为 250 ℃,采用氢火焰离子化检测器(FID)检测,其温度为 300 ℃,以峰面积内标法定量.

1.3 土壤中氨基糖含量的计算

根据内标法原理,每种氨基糖的含量($m_x, \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)可利用以下公式计算:

$$m_x = m_i A_x / A_i R_i$$

式中: m_i 为添加的内标物肌醇的质量; A_i 和 A_x 分别为样品测定中肌醇和氨基糖的峰面积; R_i 为每种氨基糖的相对校正因子,利用标准样品中氨基糖和肌醇的校正因子计算.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件处理数据和制图,应用 SPSS 13.0 统计分析软件中 ANOVA 模块里的 LSD 多重比较法检验不同处理土壤氨基糖差异的显著性.

2 结果与分析

2.1 土壤氨基葡萄糖的矿化及添加外源物质对其的影响

从图 1 可以看出,对照处理土壤中氨基葡萄糖含量随培养时间呈下降趋势,其含量从 958.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少到 890.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即到培养 210 d 时,氨基葡萄糖含量减少了 7.1%. 添加葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施处理的氨基葡萄糖含量变化趋势与对照不同,而是随培养时间呈增加趋势. 与对照处理相比,单施葡萄糖能显著提高土壤中氨基葡萄糖含量($P<0.05$),到培养 210 d 时,其氨基葡萄糖含量高达 1193.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比对照提高 34.1%. 葡萄糖与氮肥配施处理土壤氨基葡萄糖含量也显著高于对照处理($P<0.05$),但低于单施葡萄糖处理,到培养 210 d 时,其氨基葡萄糖含量为 1150.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.2 土壤胞壁酸的矿化及添加外源物质的影响

从图 1 可以看出,对照处理胞壁酸含量随培养时间呈下降趋势,到培养 210 d 时,胞壁酸含量减少了 25.4%,远高于氨基葡萄糖含量的下降幅度(7.1%). 但从数量上看,氨基葡萄糖含量的减少量(68.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)则高于胞壁酸(15.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 单施葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施处理胞壁酸含量随培养时间的变化趋势与对照处理有所不同,呈先迅速增加(最高值均出现在第 14 天)、后下降的趋势. 与对照处理相比,单施葡萄糖能显著提高土壤中的胞壁酸含量($P<0.05$),平均提高了 20.7%. 葡萄糖与氮肥配施处理胞壁酸含量也显著高于对照处理

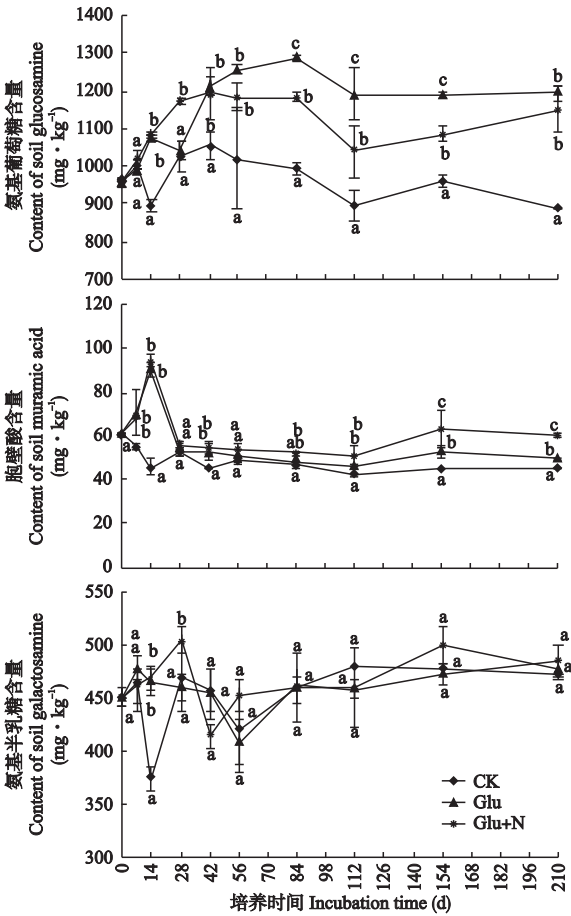


图 1 土壤氨基葡萄糖、胞壁酸和氨基半乳糖含量随培养时间的变化

Fig.1 Dynamics of the contents of soil glucosamine, muramic acid and galactosamine during incubation (mean±SD).

CK:对照 Control; Glu: 单施葡萄糖 Application glucose; Glu+N:葡萄糖与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 配施 Application glucose and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. 下同 The same below. 图中不同字母表示同一取样时间不同处理差异显著 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference at 0.05 level among treatments at the same sampling time.

($P<0.05$),并高于单施葡萄糖处理,这与氨基葡萄糖的研究结果有所不同.

2.3 土壤氨基半乳糖的矿化及添加外源物质的影响

对照处理氨基半乳糖含量几乎不随培养时间的变化而变化,培养开始和结束时氨基半乳糖含量分别为 450.7 和 472.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这一变化趋势与胞壁酸和氨基葡萄糖不同. 与对照处理相比,单施葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施对土壤中氨基半乳糖含量的影响不显著($P<0.05$);单施葡萄糖和葡萄糖与氮肥配施两种处理之间氨基半乳糖含量也差异不显著(图 1).

2.4 土壤氨基葡萄糖/胞壁酸(GluN/MurN)的变化

由图 2 可知,对照处理 GluN/MurN 在培养前期

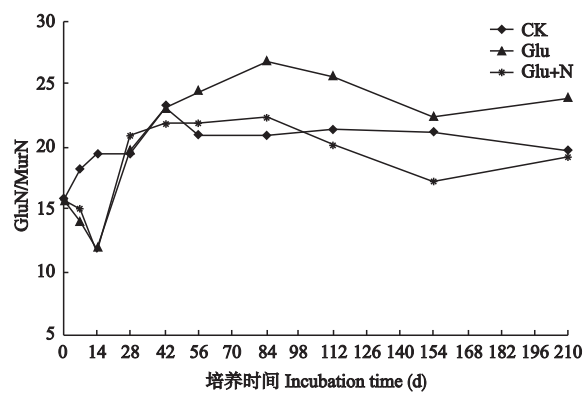


图2 土壤氨基葡萄糖/胞壁酸随培养时间的变化
Fig.2 Dynamics of soil GluN/MurN during incubation.

呈增加趋势,到第42天时达到最高值(23.2),之后略有下降并趋于平稳.单施葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施处理 GluN/MurN 的变化规律与对照处理相似,即随培养时间先增加,到84 d 达到最高值后,呈下降趋势.

3 讨 论

3.1 土壤氨基糖的矿化特征

对照处理的氨基葡萄糖和胞壁酸含量均随培养时间呈下降趋势,说明随着培养的进行,土壤中氨基葡萄糖和胞壁酸处于不断矿化过程中. Mulvaney 等^[16]的培养试验表明,随着氨基糖浓度的降低,矿化氮的含量增加.研究表明,土壤有机氮形式的微生物更替能够导致以微生物残留物形式存在的氮截获,并在有机氮降解的后期矿化.一般来说,微生物产物的降解通常是土壤微生物养分缺乏的象征^[17],当仅向土壤中加入水时,采用间歇淋洗法能够不断地从土壤中移走矿质态氮,从而导致土壤缺乏氮素,进而促使有机氮的不断矿化分解.此外,胞壁酸的矿化快于氨基葡萄糖的矿化.在土壤中氨基葡萄糖主要来源于真菌,是真菌几丁质的唯一成分和脱酰基几丁质的主要成分.胞壁酸唯一来源于细菌,它是细菌中脂多糖和细胞壁中肽聚糖的成分.本试验研究表明,以胞壁酸为代表的细菌残留物在土壤中的矿化速率快于以氨基葡萄糖为代表的真菌残留物.土壤中微生物和动物的代谢产物较难降解,一般来说细胞壁比细胞内容物难降解,真菌和放线菌的合成产物比细菌难降解^[18-19],这与本试验的研究结果一致.此外,细菌是真菌细胞壁物质的分解者,并且真菌细胞壁有黑色素保护,致使真菌细胞壁的物质循环速率较慢^[20],这也与本试验结论相符.然而,

因为氨基葡萄糖在土壤中的含量远高于胞壁酸,因此其矿化数量也高于胞壁酸.此外,因为氨基单糖具有异源性,作为土壤有机质微生物(真菌和细菌)来源的标识物,其对研究微生物对土壤有机质转化和积累的动力学过程具有重要意义.由于胞壁酸唯一来源于细菌,氨基葡萄糖主要来源于真菌,通过研究氨基葡萄糖/胞壁酸(GluN/MurN)可以获得有关细菌和真菌对土壤有机质转化的相对贡献^[6].对照处理 GluN/MurN 随培养时间变化的结果说明,在培养前期与氨基葡萄糖为代表的真菌残余物相比,以胞壁酸为代表的细菌残余物的矿化速率较快,而后期两者的矿化速率相差不多.说明在不同的培养阶段,细菌和真菌对土壤有机质转化和积累的相对贡献不同.

对照处理的氨基半乳糖含量几乎不随培养时间的变化而变化,说明氨基半乳糖在土壤中不易矿化,这一结果与细菌来源的胞壁酸不同.虽然在土壤中氨基半乳糖被认为主要来源于细菌,但其来源并没有完全明确.此外,由于氨基半乳糖和胞壁酸的结构不同^[10],因而其在土壤中周转和代谢能力也可能不同.氨基半乳糖和胞壁酸不同的矿化特征也说明:细菌残余物在土壤中可能既具有一定的抗性,也具有一定的分解性.此外,氨基半乳糖和胞壁酸不同的矿化特征,为进一步明确其微生物来源提供了新的思路,有研究者在进行选择性培养试验时发现真菌对氨基半乳糖的贡献大于细菌^[9],因此,在今后的研究中有必要对氨基半乳糖的微生物来源做进一步研究.

3.2 外源物质对土壤氨基糖矿化的调控作用

在土壤中,微生物是土壤氮素转化过程的执行者^[21],通过能源物质有机碳对氮素转化过程产生影响.一般来说,当土壤中的能量物质较少时,有机氮的矿化速率大于无机氮的生物固定速率,土壤中无机氮得以积累,出现净矿化作用.当土壤中有过量的能量物质存在时,产生净生物固定^[22].葡萄糖是较易被微生物利用的碳源与能源物质,加入到土壤后会刺激微生物的生长,从而促进土壤氮素的固定^[22].在本试验中,添加葡萄糖的处理有较高的氨基葡萄糖和胞壁酸含量,说明葡萄糖的加入促进了土壤氨基葡萄糖和胞壁酸含量的净积累. Magill 和 Aber^[23]及 Vinten 等^[24]的研究结果均表明,向土壤中添加葡萄糖后土壤有机氮几乎不发生矿化或矿化

速率较低,这与本研究结果相一致. 葡萄糖与氮肥配施处理氨基葡萄糖含量也显著高于对照处理($P < 0.05$),但低于单施葡萄糖处理. 有研究表明,当向土壤中同时加入葡萄糖和氮肥时,在微生物的作用下,氮肥会被用于合成氨基糖聚合物. 但是,也有研究通过 ^{15}N 同位素标记试验表明,施用无机氮肥后,非标记土壤氮的矿化或作物从土壤中吸收的非标记氮较不施肥对照有所增加,这一现象被认为是无机氮肥的施用加速了土壤有机氮的分解^[25-26]. 而本试验可能是两者共同作用的结果. 葡萄糖与氮肥配施处理胞壁酸含量显著高于对照处理($P < 0.05$),并高于单施葡萄糖处理,这说明葡萄糖与氮肥配施处理胞壁酸的合成速率大于矿化速率. 此外,细菌和真菌的循环速率不一致. 细菌个体小、数量多、分布广、代谢强、繁殖快,且与土壤接触的面积大,因而在养分竞争中非常活跃,快速生长的细菌是氮的汇^[27]. GluN/MurN 的变化也说明细菌和真菌残余物在土壤有机氮矿化过程中具有不同的矿化特征,暗示细菌和真菌在土壤有机氮转化过程中具有不同的作用. 然而,单施葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施处理氨基半乳糖含量变化情况与对照处理相差不多,均与对照差异不显著($P < 0.05$),说明氨基半乳糖在土壤中的矿化不易受到外源物质的影响,在土壤中较稳定.

综上所述,土壤中不同种类的氨基糖具有不同的矿化特征. 总体来看,以胞壁酸为代表的细菌残余物的矿化速率快于以氨基葡萄糖为代表的真菌残余物,氨基半乳糖在土壤中的矿化速率最慢. 然而,因为氨基葡萄糖在土壤中的含量远高于胞壁酸,因此其矿化数量高于胞壁酸. 土壤中氨基糖含量的变化受到外源物质的调控,与对照处理相比,葡萄糖以及葡萄糖与氮肥配施均能促进土壤氮素的微生物学固定作用,进而表现为土壤氨基葡萄糖和胞壁酸含量的净积累,而氨基半乳糖对单施葡萄糖以及葡萄糖和氮肥配施的响应较小,说明氨基半乳糖含量不易受到外源物质的影响.

参考文献

- [1] Wang S-Q (王树起), Han X-Z (韩晓增), Qiao Y-F (乔云发), *et al.* Effects of long term fertilization on enzyme activities in black soil of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 551–556 (in Chinese)
- [2] Lu C-Y (鲁彩艳), Niu M-F (牛明芬), Chen X (陈欣), *et al.* Nitrogen mineralization potentials of meadow brown soil in different fertilization practice. *Journal of Liaoning Technical University* (辽宁工程技术大学学报), 2007, **26**(5): 773–775 (in Chinese)
- [3] Tian M-J (田茂洁). Review on the contributing factors to mineralization of soil nitrogen. *Journal of China West Normal University* (Natural Sciences) (西华师范大学学报·自然科学版), 2004, **25**(3): 298–303 (in Chinese)
- [4] Roberts P, Bol R, Jones DL. Free amino sugar reactions in soil in relation to soil carbon and nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 3081–3092
- [5] Parsons JW. Chemistry and distribution of amino sugars in soils and soil organisms// Paul EA, Ladd JN, eds. *Soil Biochemistry*, Vol. 5. New York: Marcel Dekker, 1981: 198–204
- [6] Zhang X, Amelung W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, galactosamine, and mannosamine in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 1201–1206
- [7] Guggenberger G, Frey SD, Six J, *et al.* Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 1188–1198
- [8] Amelung W. Methods using amino sugars as markers for microbial residues in soil// Lal R, Kimble JM, Follett RF, *et al.*, eds. *Assessment Methods for Soil Carbon*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2001: 233–234
- [9] Glaser B, Turrión M, Alef K. Amino sugars and muramic acid-biomarkers for soil microbial community structure analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 399–407
- [10] Liang C, Zhang X, Balser TC. Net microbial amino sugars accumulation process in soil as influenced by different plant material inputs. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, **44**: 1–7
- [11] Liang C, Fujinuma R, Balser TC. Comparing PLFA and amino sugars for microbial analysis in an Upper Michigan old growth forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 2063–2065
- [12] Engelking B, Flessa H, Joergensen RG. Shifts in amino sugar and ergosterol contents after addition of sucrose and cellulose to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 2111–2118
- [13] Zhang X, Amelung W, Yuan Y, *et al.* Land-use effects on amino sugars in particle size fractions of an Argiudoll. *Applied Soil Ecology*, 1999, **11**: 271–275
- [14] Zhang X, Amelung W, Yuan Y, *et al.* Amino sugar

- signature of particle size fractions in soils of the native prairie as affected by climate. *Soil Science*, 1998, **163**: 220–229
- [15] Stanford G, Smith SJ. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, **36**: 465–472
- [16] Mulvaney RL, Khan SA, Hoeft RG, *et al.* A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**: 1164–1172
- [17] Amelung W. Nitrogen biomarkers and their fate in soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, **166**: 677–686
- [18] Lützow MV, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – A review. *European Journal of Soil Science*, 2006, **57**: 426–445
- [19] Six J, Frey SD, Thiet RK, *et al.* Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 555–569
- [20] Paul EA, Clark FE. *Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego: Academic Press, 1996
- [21] Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Science*. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] Azam F, Ifzal M. Microbial populations immobilizing NH_4^+ -N and NO_3^- -N differ in their sensitivity to sodium chloride salinity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2491–2494
- [23] Magill AH, Aber JD. Variation in soil net mineralization rates with dissolved organic carbon additions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 597–601
- [24] Vinten AJA, Whitmore AP, Bloem J, *et al.* Factors affecting N immobilisation/mineralisation kinetics for cellulose-, glucose-, straw-amended sandy soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**: 190–199
- [25] Xue JM, Clinton PW, Sands R, *et al.* Fate of biuret ^{15}N and its effect on net mineralisation of native soil N in forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, **46**: 636–644
- [26] Chaves B, De Neve S, Boeckx P, *et al.* Manipulating the N release from ^{15}N labelled celery residues by using straw and vinasses. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 2244–2254
- [27] Goldman JC, Dennett MR. Ammonium regeneration and carbon utilization by marine-bacteria grown on mixed substrates. *Marine Biology*, 1991, **109**: 369–378

作者简介 张威,女,1980年生,博士,助理研究员. 主要从事土壤中碳、氮转化与循环研究,发表论文10余篇. E-mail: zhangw@iae.ac.cn

责任编辑 张凤丽
