



施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响

焦亚鹏¹, 齐鹏^{1,2,3}, 王晓娇^{1,4}, 武均^{1,2,3}, 姚一铭¹, 蔡立群^{1,2,3}, 张仁陟^{1,2,3}

(¹甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; ²甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070; ³甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070; ⁴甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】探讨不同施氮量条件下土壤氮素转化酶活性和有机氮组分含量的变化规律, 并分析氮素转化酶活性与各有机氮组分之间的关系, 为陇中黄土高原旱作农业区合理制定施肥量和施肥方案提供参考依据。【方法】基于设置在陇中黄土高原定西市李家堡镇麻子川村的不同施氮量(0(CK)、52.5(N1)、105(N2)、157.5(N3)、210(N4) kg N·hm⁻²)春小麦长期定位试验, 收获后使用 Bremner 法测定 0—40 cm 土层中有机氮组分含量, 以及 4 种氮素转化相关酶的活性。【结果】土壤有机氮组分分配比例顺序为氨基酸态氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮, 同一土层随着施氮量的增加土壤有机碳、全氮、酸解总氮、氨基酸态氮、酸解铵态氮和脲酶活性、蛋白酶活性均呈先增大后降低的趋势, 除全氮外其余都在 N2 处理时最大, 全氮含量在 N3 处理时达到最大; 同一处理不同土层间均随土层加深而降低。冗余分析结果表明, 全氮含量和蛋白酶活性是影响陇中黄土高原农田有机氮组分分布与转化的关键因子; 碳氮比与所有有机氮组分均呈负相关, 蛋白酶、有机碳和脲酶与氨基酸态氮呈极显著正相关。【结论】综合而言, N2 处理土壤供氮潜力最高, 全氮和蛋白酶是影响该区春小麦土壤有机氮组分转化的关键因子。氮肥合理施用能明显提高土壤有机氮含量, 不同施氮量条件下土壤有机氮组分变化差异明显, 改变了氮素相关转化酶的活性。

关键词: 施氮量; 春小麦; 有机氮组分; 酶活性; 冗余分析; 黄土高原

Effects of Different Nitrogen Application Rates on Soil Organic Nitrogen Components and Enzyme Activities in Farmland

JIAO YaPeng¹, QI Peng^{1,2,3}, WANG XiaoJiao^{1,4}, WU Jun^{1,2,3}, YAO YiMing¹, CAI LiQun^{1,2,3}, ZHANG RenZhi^{1,2,3}

(¹College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; ²Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; ³Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-Saving, Lanzhou 730070; ⁴College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: 【Objective】The changes in enzyme activity conversion and soil organic nitrogen components in different nitrogen application rates were studied, and the relationship between enzyme activity and organic nitrogen component was analyzed. It provided a reference for rationally formulating fertilization amount and fertilization plan in the dry farming area of the Loess Plateau. 【Method】Based on the different nitrogen (N) application rates (0 (CK), 52.5 (N1), 105 (N2), 157.5 (N3), and 210 (N4) kg N·hm⁻²) in Mazichuan village, Lijiabao town, Dingxi city, Loess Plateau, a long-term positioning test was set up on a spring wheat field. Bremner's method was used to determine the content of organic nitrogen in the 0-40 cm soil layer after harvest, and the activities of four nitrogen-related enzymes were also measured. 【Result】The order of distribution of soil organic nitrogen components was: amino acid nitrogen>acidolizable ammonia nitrogen>unknown-acidolizable nitrogen>amino sugar nitrogen. With the increase of N

收稿日期: 2019-09-01; 接受日期: 2019-09-25

基金项目: 甘肃农业大学学科建设基金 (GAU-XKJS-2018-205)、甘肃农业大学盛彤笙基金 (GSAU-STS-1706)、青年研究生导师扶持基金 (GAU-QNDS-201704)、国家自然科学基金项目 (31571594、41661049)

联系方式: 焦亚鹏, E-mail: jypm1015@163.com。通信作者齐鹏, E-mail: gsauqip@163.com

application rate, soil organic carbon, total nitrogen, total acid nitrogen, amino acid nitrogen, acidolizable ammonium, urease activity and protease activity increased first and then decreased. Except for total nitrogen, all other components reached the maximum value under N2, and the total nitrogen content reached the maximum value under N3. Different soil layers in the same treatment decreased with the increasing soil depths. The results of redundancy analysis indicated that total nitrogen content and protease activity were the key factors affecting the distribution and transformation of organic nitrogen components in the Loess Plateau of Longzhong. C:N ratio was negatively correlated with all organic nitrogen components, while protease, organic carbon and urease were positively correlated with amino acid nitrogen. 【Conclusion】 In general, N2 treatment had the highest nitrogen supply potential, and the total nitrogen was the key factor affecting the transformation of organic nitrogen components in spring wheat in this area. The changes of soil organic nitrogen composition under different nitrogen application rates were obvious, which changed nitrogen in the conversion enzyme activity.

Key words: nitrogen application rate; spring wheat; organic nitrogen component; enzyme activity; redundancy analysis; Loess Plateau

0 引言

【研究意义】土壤是陆地上各种植物生长的基床,氮素是土壤中影响植物生长和农田生态系统生产力的主要限制因子^[1-2]。氮素在土壤中主要以有机形态存在^[3-5],约占土壤全氮的85%—90%,有机氮只有通过矿化转化为无机氮才能被植物吸收利用。土壤有机氮主要包括蛋白质、核酸、氨基酸及氨基糖等^[6],难以分离测定。1965年,BREMNER等^[7]提出用酸解的方法把土壤有机氮分为酸解氮和非酸解氮两大部分,其中酸解性氮中可以鉴别的有机氮化合物主要是氨基酸态氮、氨基糖态氮和铵态氮,还有一些未鉴别的含氮化合物^[8]。土壤酸解铵态氮是可直接供当季作物吸收利用的有效态氮,氨基酸态氮是土壤固持氮的重要储存库,在当季作物生产过程中主要充当过渡氮库的作用^[9]。氨基酸态氮和酸解铵态氮是土壤易矿化有机态氮的源和库^[10]。土壤有机氮不仅可以维持土壤氮素肥力,而且对土壤氮素供应能力具有重要意义^[11]。土壤酶是土壤中重要的生物催化剂,参与土壤中重要营养元素的生物化学循环、土壤有机质及矿物质的转化过程等^[12]。土壤酶对于环境和管理因素引起的变化最为敏感,其高低可以反映土壤养分转化能力的强弱和土壤供应植物根系养分的潜在能力^[13-14]。土壤蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶是参与土壤氮素转化的关键酶,其活性的高低与土壤氮素转化强度及土壤供氮能力密切相关^[15]。陇中黄土高原旱作农田土壤有机质含量低,氮素供应能力较差,当地农民习惯施用大量氮肥以保证获得较高作物产量,而长期大量氮肥施用不仅不能达到农作物增产增效,而且还会导致氮素的大量残留而造成经济损失、耕地质量下降和严重的环境问题。施氮量的不同会影响土壤氮素转化酶活性,进而影响土壤氮循环^[16]。因此研

究不同施氮量下土壤有机氮组分特征及其影响因素,对于陇中黄土高原旱作农田合理施用氮肥有重要意义。【前人研究进展】施用氮肥可以改变农田土壤有机氮组分,但是对于土壤中不同的氮组分影响不一致。施氮显著提高了土壤酸解总氮的含量,但未酸解态氮含量未明显增加^[3,17];施氮显著提高了酸解铵态氮的含量但降低了氨基糖态氮的含量,氨基酸态氮和酸解未知态氮的含量增加不显著^[14,18];TIAN等^[19]研究发现,氮添加能够降低土壤氨基酸氮含量,增加氨基糖氮含量。施氮改变了土壤酸解有机氮组分的分配比例,其顺序为氨基酸态氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮^[20-23],氨基酸态氮、酸解未知态氮和酸解铵态氮是土壤活性氮的主要贡献因子^[3,17,24]。吴汉卿等^[18]研究发现,除氨基糖氮,其余酸解态氮各组分和酸解总氮含量及其占全氮比例均随着土层深度的增加而降低,不同土层含量差异显著。施氮能显著提高脲酶和蛋白酶活性^[25-26],降低硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性^[27],但是对于不同氮素添加水平响应不一致。随着施氮量的增加,脲酶和蛋白酶活性先升高后降低^[24,28],硝酸还原酶活性逐渐增大^[26]。【本研究切入点】综上,施氮对有机氮组分的组成与转换特征已有大量的研究,然而不同施氮量如何影响陇中黄土高原旱作农业区农田土壤有机态氮组分以及土壤氮素转化酶对土壤有机氮组分转化的影响研究较少,须进一步研究加以阐明。【拟解决的关键问题】本研究通过设置在陇中黄土高原定西市李家堡镇麻子川村的长期定位春小麦施氮量试验,测定春小麦农田氮素转化酶(脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶)活性,并用BREMNER^[7]提出的酸解法测定土壤不同有机氮组分含量,探讨施氮量对氮素转化酶活性和有机氮组分组成的影响,并分析氮素转化酶活性与各有有机氮组分之间的关系,以揭示土壤氮素转化酶活性对

土壤有机氮组分的影响特征, 为陇中黄土高原旱作农业区合理制定施肥量和施肥方案、优化管理方式, 减少肥料浪费和环境污染, 提高氮肥利用率, 实现增产稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇麻子川村 (35°28' N, 104°44' E)。试区农田土壤为典型的黄绵土, 质地均匀、土质绵软。平均海拔 2 000 m, 无霜期 140 d, 年均日照时数 2 476.6 h, 年均太阳辐射 594.7 kJ·cm⁻², 年均气温 6.4℃, ≥0℃积温 2 933.5℃, ≥10℃积温 2 239.1℃, 属中温带半干旱区; 多年平均降水 390.9 mm, 年蒸发量 1 531 mm, 80%保证率的年降水量为 365 mm, 变异系数为 24.3%, 为典型的雨养农业区。

1.2 试验设计

试验自 2013 年布设至今, 共设 5 个施氮水平: 0 (CK)、52.5 (N1)、105 (N2)、157.5 (N3)、210 (N4) kg·hm⁻², 3 次重复, 随机区组分布, 共计 15 个小区 (面积 15 m²), 于播种前施肥, 不追肥。供试作物为春小麦 (定西 40 号)。氮肥为尿素 (N 46%), 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 14%), 各小区均施 105 kg·hm⁻²。2017 年 3 月下旬播种, 7 月下旬收获, 播种量 187.5 kg·hm⁻², 行距 20 cm, 播深 7 cm。

1.3 样品采集与分析

在 2017 年 7 月下旬, 春小麦收获后在整个小区采用 “S” 型 5 点取样方法采集 0—10、10—20 和 20—40 cm 3 层土样, 混匀并挑除动植物残体, 立即过 2 mm 筛, 一部分土样低温冷藏 (4℃), 用于测定土壤酶活性等指标, 剩余土样风干后备用。

土壤 pH 采用水土比 2.5 : 1 电位法测定^[29]; 有机碳 (soil organic carbon, SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[29]; 全氮 (total nitrogen, TN) 采用 H₂SO₄ 消煮-凯氏定氮法测定^[29]; 全磷 (total phosphorus, TP) 采用 H₂SO₄-HClO₄ 酸溶-钼锑抗比色法测定^[29]; 脲酶 (urease, UR) 活性采用次氯酸钠-苯酚钠比色法测定^[30]; 硝酸还原酶 (nitrate reductase, NR) 采用酚二磺酸比色法测定^[30]; 亚硝酸还原酶 (nitrite reductase, NIR) 采用酚二磺酸比色法测定^[30]; 蛋白酶 (proteinase, PR) 采用加勒斯江法测定^[31]。

土壤有机氮分级采用 BREMNER 方法^[7]: 酸解总氮 (total acidolizable N, TAN) 采用凯氏定氮法测定;

氨基酸态氮 (amino acid N, AAN) 采用茚三酮氧化、磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定; 酸解铵态氮+氨基糖态氮 (acidolizable ammonia N, AN+amino sugar N, ASN) 采用磷酸盐-硼酸盐缓冲液蒸馏法测定; 酸解铵态氮采用氧化镁蒸馏法测定; 酸解未知态氮 (unknown-acidolizable N, UAN)、未酸解氮 (non-acidolizable N, NAN) 和氨基糖态氮则采用差减法求得。

酸解未知态氮=酸解总氮-酸解铵态氮-氨基酸态氮-氨基糖态氮;

未酸解氮=全氮-酸解总氮;

氨基糖态氮=(酸解铵态氮+氨基糖态氮)-酸解铵态氮。

1.4 数据处理

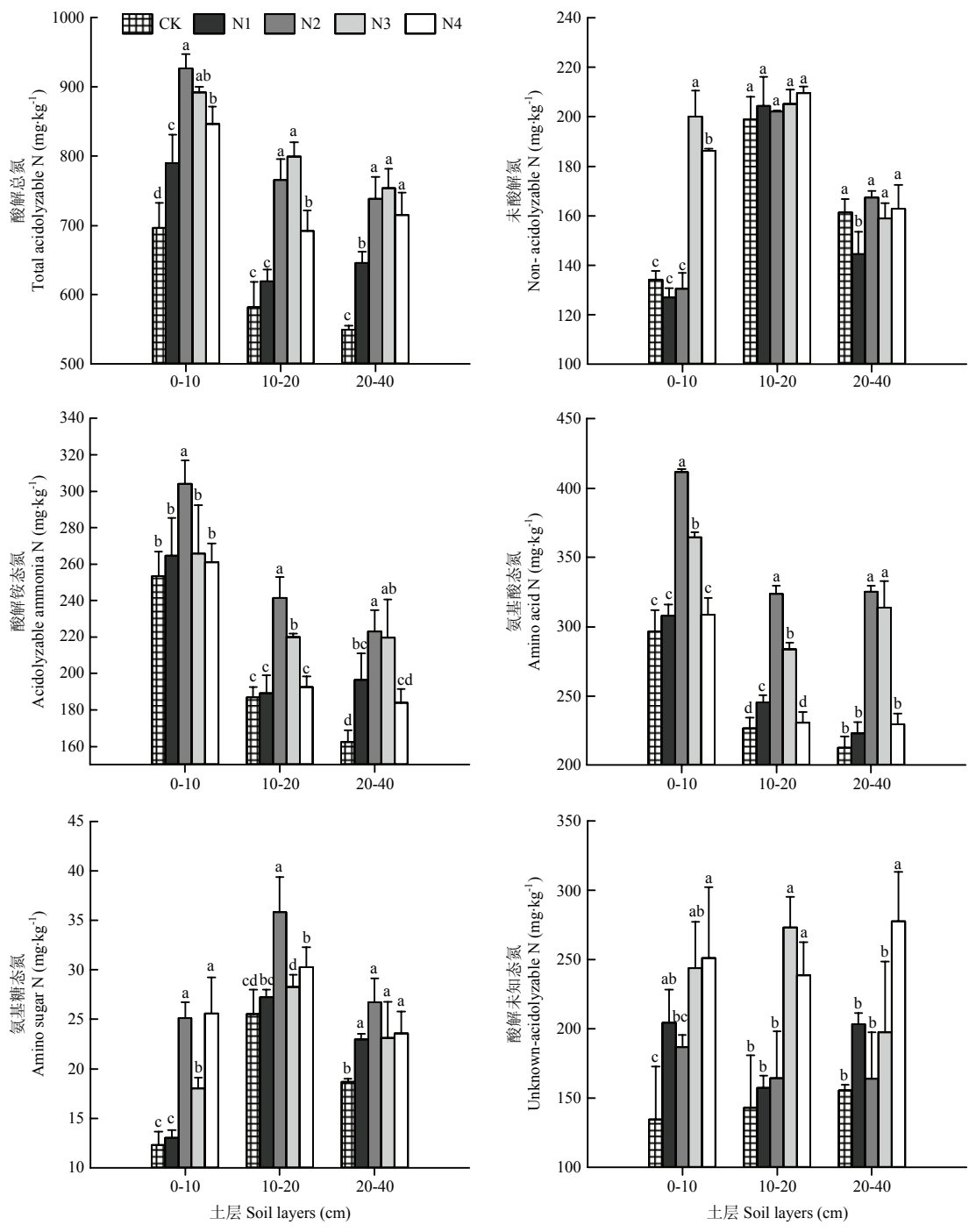
用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 进行试验数据统计分析, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) Duncan 法进行多重比较分析, SigmaPlot 14.0 作图, 用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析 (RDA)。

2 结果

2.1 施氮量对土壤有机氮组分含量的影响

由图 1 可知, 连续施用氮肥提高了土壤中酸解总氮的含量, 占土壤全氮的 74.4%—87.7%, 各土层土壤酸解总氮的含量随着施氮量的增加呈先升高后降低的趋势, 0—10 cm 土层, N2 处理含量最高, 10—20 和 20—40 cm 土层, N3 处理含量最高。相较于 CK 处理, 酸解总氮增加了 37.2—230.1 mg·kg⁻¹。酸解总氮含量随着土层的加深逐渐降低。未酸解氮是土壤氮库中较为稳定的组分, 其含量占土壤全氮的 12.3%—25.6%, 不同处理间变化不显著, 随着土层的加深呈先升高后降低的趋势, 在 10—20 cm 土层含量最高。

不同施氮量不仅影响了土壤酸解总氮的含量, 土壤酸解氮各组分含量也发生了明显变化。土壤氨基酸态氮、酸解铵态氮、氨基糖态氮和酸解未知态氮分别占土壤全氮的 24.4%—36.1%、20.3%—30.3%、1.4%—3.6%和 16.1%—31.7%, 氮肥添加显著影响了它们的含量。各土层土壤氨基酸态氮和酸解铵态氮含量均随着氮肥投入量的增加呈先升高后降低的趋势, 以 N2 处理的含量最高; 氨基糖态氮含量明显增加, 0—10 cm 土层 N4 处理含量最高, 10—20 和 20—40 cm 土层含量 N2 处理最高; 酸解未知态氮含量明显增加, 0—10 和 20—40 cm 土层 N4 处理的含量最高, 10—20 cm 土层 N3 含量最高; 较 CK 处理, 其余各处理氨基酸态



同一土层不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同
Different lower case letters with the same soil layer indicate significant difference among different treatment at the 0.05 level. The same as below

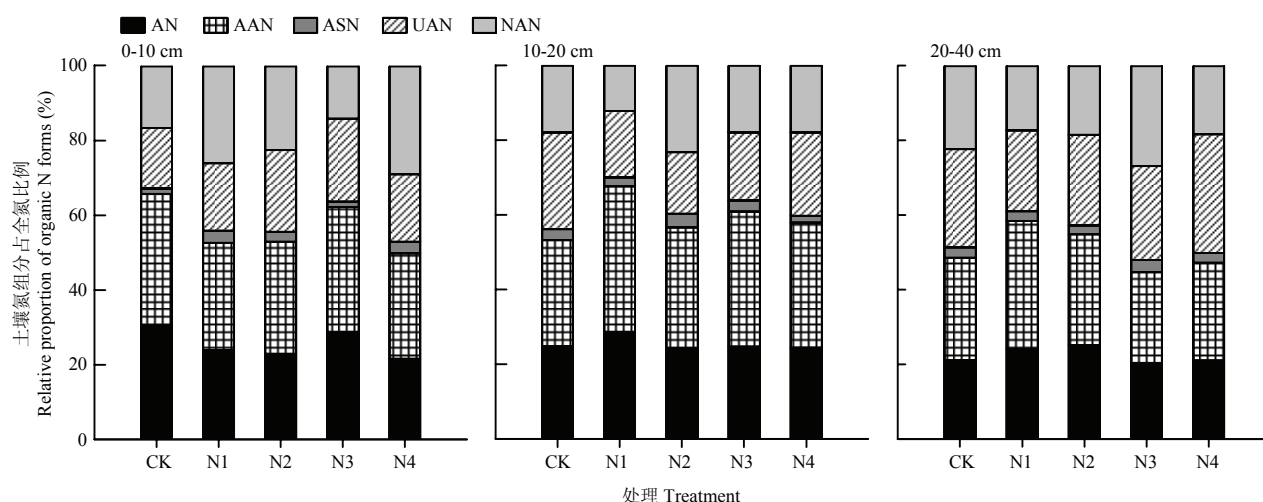
图 1 施氮量对各土壤有机氮组分含量的影响

Fig. 1 Influence of soil organic N forms content under different nitrogen rates

氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮和酸解未知态氮含量分别增加了 1.8%—52.8%、1.2%—37.2%、5.9%—108.1%和 5.3%—91.0%。不同土层氨基酸态氮和酸解

铵态氮含量，随着土层的加深逐渐降低。土壤氨基糖态氮含量随着土层的加深先增加后减小。

由图 2 可知，在 0—10 cm 土层，施用氮肥降低



AN: 酸解铵态氮 Acidolizable ammonia N; ASN 氨基糖态氮 Amino sugar N; AAN 氨基酸态氮 Amino acid N; UAN: 酸解未知氮 Unknown-acidolizable N; NAN 未酸解氮 Non-acidolizable N

图 2 施氮量对土壤不同形态氮组分的影响

Fig. 2 Influence of soil organic N forms under different nitrogen rates

了氨基酸态氮和酸解铵态氮占全氮的比例, 增加了氨基糖态氮、酸解未知态氮和未酸解氮占全氮的比例; 在 10—20 cm 土层, 施氮肥降低了酸解铵态氮和酸解未知态氮占全氮的比例, 增加了氨基酸态氮、氨基糖态氮和未酸解氮占全氮的比例; 在 20—40 cm 土层, 施氮肥降低了氨基糖态氮、酸解未知态氮和未酸解氮占全氮的比例, 而酸解铵态氮和氨基酸态氮占全氮比例变化不显著。不同土层间, 没有明显的变化趋势。

2.2 施氮量对土壤基本化学性质的影响

由表 1 可知, 土壤 pH 的变化范围 8.11—8.41, 随着施氮量的增加 pH 降低, 且随着土层的加深 pH 升高。土壤有机碳含量在 7.36—9.45 g·kg⁻¹ 间变动, 随着土层的加深其含量值降低; 在 0—10 和 20—40 cm 土层, 各处理间有机碳含量随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势, N2 处理含量最高; 在 10—20 cm 土层, 随着施氮量的增加逐渐增加。各处理土壤全氮均随土层加深而降低; 在 0—40 cm 各土层, 均以 N3 处理的土壤全氮含量最高, CK 处理最低。当施氮量 ≤ 157.5 kg·hm⁻³ (N3) 时, 土壤全氮含量随施氮量增加而增加; 施氮量 > 157.5 kg·hm⁻³ (N3) 时, 土壤全氮含量反而降低。在 0—40 cm 土层, 各处理土壤全氮含量均显著高于 CK 处理, 较 CK 处理分别升高 10.0%—29.9%、14.4%—35.8%和

10.8%—28.6%。土壤全磷含量在 0.58—0.96 g·kg⁻¹ 间变动, 随土层加深全磷含量降低, 同一土层不同处理随着施氮量的增加全磷含量先降低后增加, N3 处理含量最低。土壤 C : N 的变化范围 8.71—10.23, 同一处理随着土层的加深 C : N 升高。同一土层不同处理均随施氮量的增加先减小后增加, N3 处理最低。

2.3 施氮量对土壤氮素转化酶活性的影响

如图 3 所示, 施氮量对土壤脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶影响显著 ($P > 0.05$)。土壤脲酶活性变化范围 0.85—1.42 mg glucose·g⁻¹·24 h⁻¹, 随着土层的加深同一处理土壤脲酶活性逐渐降低, 同一土层不同处理脲酶活性随着施氮量的增加先增加后减小, N2 处理活性最高。土壤蛋白酶活性变化规律与脲酶一致, 变化范围 0.38—0.48 mg glycine·g⁻¹·24 h⁻¹。土壤硝酸还原酶活性变化范围 0.10—0.26 NO₂⁻-N mg·g⁻¹·24 h⁻¹, 连续施氮对硝酸还原酶活性影响显著, 没有明显的变化趋势, 0—10 和 10—20 cm 土层土壤 N2 处理活性最高, 20—40 cm 土层 CK 处理活性最高。土壤亚硝酸还原酶活性变化范围 0.47—0.55 mg NO₂⁻-N·g⁻¹·24 h⁻¹, 随着土层的加深其活性逐渐升高; 0—10 和 10—20 cm 土层, 土壤亚硝酸还原酶活性随着施氮量的增加先增加后降低, N3 处理活性最高; 20—40 cm 土层先降低后增加, N4 处理活性最高。

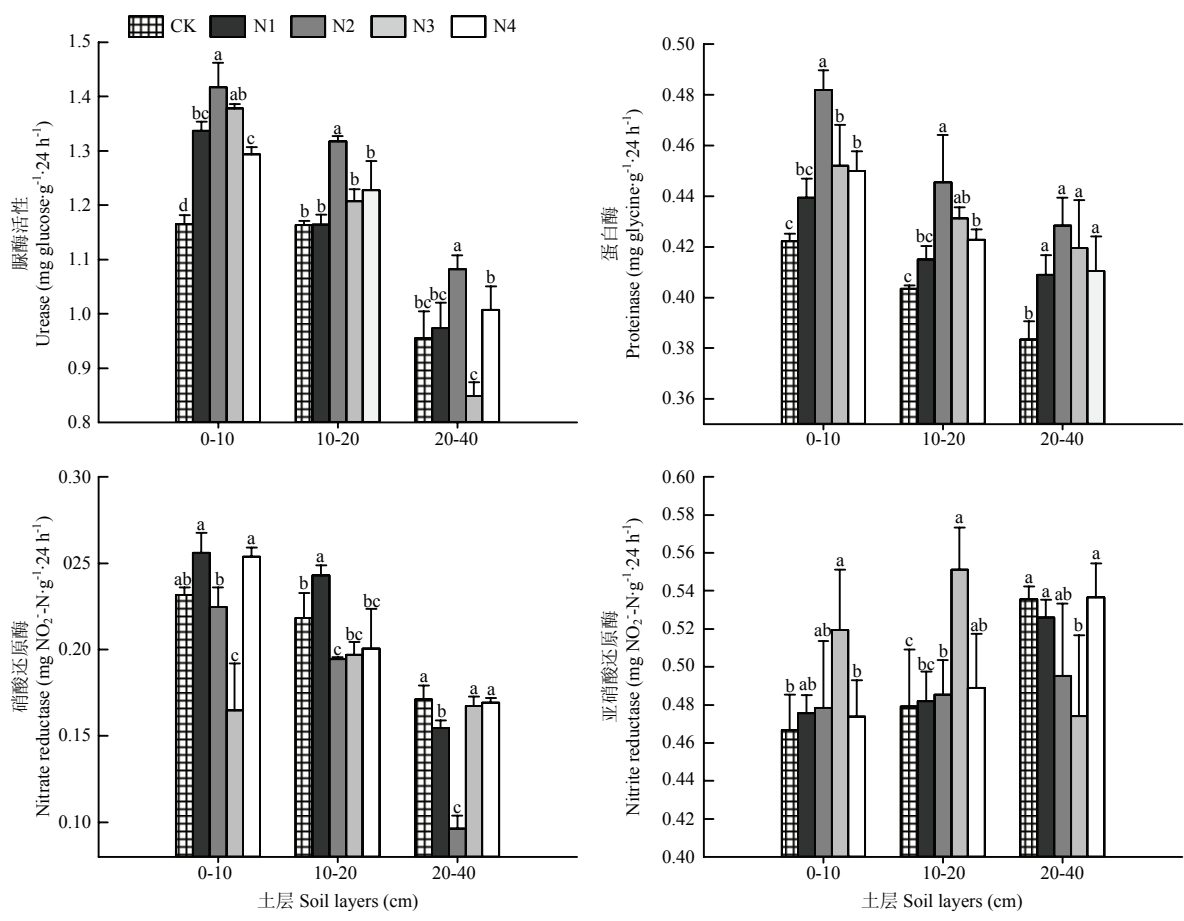


图 3 施氮水平对土壤酶活性的影响

Fig. 3 Influence of soil enzyme activities under different nitrogen rates

2.4 土壤环境因子与有机氮组分之间的关系

冗余分析 (RDA) 结果如图 4 所示。环境因子 (土壤基本化学性质和氮素转换酶) 对有机氮组分的解释率为 82.2%，第一轴解释率为 32.96%，第二轴解释率为 28.88%。从图 4 可以看出，酸解铵态氮、氨基酸态氮与 pH、全氮、全磷、硝酸还原酶、有机碳、蛋白酶和脲酶呈正相关，与亚硝酸还原酶和 C : N 呈负相关。氨基糖态氮与全磷、pH、硝酸还原酶、C : N 呈负相关，与其全氮、有机碳、蛋白酶、脲酶、亚硝酸还原酶呈正相关。酸解未知态氮与 C : N 和硝酸还原酶呈负相关，与其他环境因子呈正相关。未酸解态氮与亚硝酸还原酶和全氮呈正相关，与其他环境因子呈负相关。全氮是影响有机氮组分变化的最重要因子，对方差的解释率为 27.45%；蛋白酶对有机氮组分变化的影响次之，对方差的解释率为 22.19%。蛋白酶、脲酶和有机碳与氨基酸态氮呈极显著相关关系。环境变量对有机氮组分方差解释率大小顺序为全氮>蛋白酶>C : N>有机碳

>脲酶>全磷>pH>亚硝酸还原酶>硝酸还原酶。

3 讨论

3.1 土壤有机氮组分对施氮量的响应

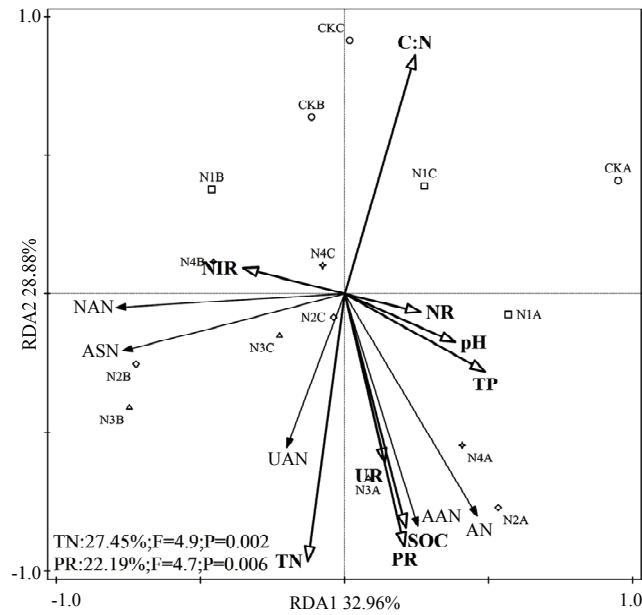
本研究中，施氮显著提高了土壤酸解总氮的含量，但未酸解态氮含量则未明显增加。贾倩等^[3]对不同氮肥用量水稻-棉花轮作农田的研究也表现出相似结果。本研究中，随着施氮量的增加土壤酸解总氮先增加后降低，这与全氮的变化趋势基本一致。有研究表明^[22]，土壤全氮与酸解总氮呈极显著相关关系。姬景红等^[20]发现，当全氮超过一定阈值，酸解总氮随着全氮含量的增加反而降低，减少的土壤有机氮主要转化为难于矿化的稳定态有机氮而保存于土壤中。这说明适量施氮有利于提高氮肥利用率。彭令发等^[32]认为未酸解态氮是以杂环氮或与杂环和芳香环结合态存在。而杂环或芳香环类化合物均为稳定性氮化合物，不易被矿化^[33]。

表 1 施氮量对土壤基本化学性质的影响

Table 1 Influence of soil physical-chemical proprieties under different nitrogen level

处理	土层	pH	有机碳	全氮	全磷	C : N
Treatment	Soil layers (cm)		Soil organic C (g·kg ⁻¹)	Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	
CK	0-10	8.24 ± 0.03a	8.31 ± 0.19c	0.84 ± 0.02c	0.93 ± 0.02a	9.63 ± 0.49ab
	10-20	8.37 ± 0.02a	8.02 ± 0.06b	0.79 ± 0.04c	0.79 ± 0.01a	10.11 ± 0.27a
	20-40	8.41 ± 0.03a	7.36 ± 0.25b	0.71 ± 0.01c	0.63 ± 0.00a	10.20 ± 0.38a
N1	0-10	8.18 ± 0.02b	9.38 ± 0.12b	0.92 ± 0.03b	0.92 ± 0.00ab	9.72 ± 0.28a
	10-20	8.27 ± 0.03b	8.67 ± 0.20ab	0.87 ± 0.05bc	0.79 ± 0.01ab	10.23 ± 0.2ab
	20-40	8.35 ± 0.02ab	7.99 ± 0.08ab	0.79 ± 0.01b	0.61 ± 0.00b	9.95 ± 0.13ab
N2	0-10	8.18 ± 0.01b	9.45 ± 0.14a	1.06 ± 0.01a	0.88 ± 0.01bc	8.73 ± 0.27bc
	10-20	8.23 ± 0.04b	8.74 ± 0.30a	1.00 ± 0.04ab	0.79 ± 0.03bc	9.05 ± 0.25bc
	20-40	8.31 ± 0.04bc	8.66 ± 0.14a	0.90 ± 0.02a	0.61 ± 0.01bc	9.23 ± 0.29bc
N3	0-10	8.11 ± 0.01c	9.40 ± 0.06ab	1.09 ± 0.01a	0.85 ± 0.02c	8.71 ± 0.12c
	10-20	8.20 ± 0.01b	8.87 ± 0.07a	1.04 ± 0.02a	0.72 ± 0.01c	8.98 ± 0.17c
	20-40	8.26 ± 0.04bc	8.03 ± 0.21ab	0.91 ± 0.02a	0.58 ± 0.00c	8.91 ± 0.38c
N4	0-10	8.11 ± 0.00c	9.13 ± 0.14ab	1.04 ± 0.01a	0.96 ± 0.02ab	8.77 ± 0.13c
	10-20	8.11 ± 0.02c	9.01 ± 0.17a	0.95 ± 0.05ab	0.81 ± 0.00a	10.22 ± 0.26b
	20-40	8.22 ± 0.01c	7.93 ± 0.01b	0.88 ± 0.01a	0.63 ± 0.01a	9.20 ± 0.12c

表中数值均为平均值±标准差 (n=3); 同列不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平
The numeric values are all of mean ± standard deviation (n=3); Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level



PR:蛋白酶 Proteinase; UR:脲酶 Urease; NR:硝酸还原酶 Nitrate reductase; NIR:亚硝酸还原酶 Nitrate reductase; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; C:N:碳氮比 C:N; AN:酸解铵态氮 Acidolyzable ammonia N; ASN 氨基糖态氮 Amino sugar N; AAN 氨基酸态氮 Amino acid N; UAN:酸解未知氮 Unknown-acidolyzable N; NAN 未酸解氮 Non-acidolyzable N; CKA:CK 为试验处理, A 为 0—10 cm 土层, B、C 分别为 10—20, 20—40 cm 土层. CKA:CK is the treatment, A is 0-10 cm soil layer, B, C is 10-20 and 20-40 cm soil layer, respectively

图 4 土壤基础化学性质和氮素转化酶与氮组分的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil chemical properties, enzyme activities and soil organic nitrogen forms

本研究中, 酸解有机氮组分分配比例顺序为氨基酸态氮>酸解铵态氮>酸解未知态氮>氨基糖态氮, 这与前人^[20-23]的研究结果一致, 说明即使在不同的区域, 土壤有机氮组分的分布特征也有一定的共性。党亚爱等^[23]对黄土高原典型土壤氮组分研究表明, 氨基酸态氮和酸解铵态氮是土壤中最主要的有机氮形态, 氨基酸态氮和酸解铵态氮是土壤易矿化有机态氮的源和库, 与土壤的供氮能力密不可分^[34]。本研究中, 土壤氨基酸态氮和酸解铵态氮含量均在 N2 处理达到峰值。这可能是由于长期连续施氮通过影响土壤 pH、有机质、全氮含量从而影响土壤微生物活动进而决定有机氮转化过程。近年来有研究发现^[32,35], 酸解未知态氮主要由杂环态氮、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低的物质组成, 由于它的矿化速率很低, 是土壤酸解有机氮库中难矿化的组分, 通常容易在土壤中积聚^[36]。本研究结果表明, 随施氮量的增加, 酸解未知态氮含量明显增加。这与贾情等^[3]在不同施氮量水稻-油菜轮作农田的研究结果一致。但王媛等^[37]在不同栽培模式和施氮量对小麦-玉米轮作研究结果表明, 施氮量对酸解未知态氮含量无显著影响。这可能由于施肥年限、土壤类型、栽培模式等不同影响土壤微生物活性, 从而影响有机氮的分配与转化。

氨基糖态氮占酸解有机氮的比例很低, 主要成分为氨基葡萄糖、氨基半乳糖和胞壁酸, 主要源于微生物细胞壁的残留物, 它反映的是已死亡的土壤微生物积累量而不是现存的微生物量^[3,37-38]。对于氨基糖态氮而言, 不同施氮量对其变化很小, 但是有所提高, 这与很多已报道的研究结果^[3,32,39-40]类似。但是巨晓棠等^[11]在 15 年有机肥与化肥定位试验耕层土壤有机氮组分研究结果表明施用氮肥显著降低了氨基糖态氮的含量, 这与本文的结果并不一致。这可能是由于不同的施氮管理措施、试验的年限、取样方式与研究区域等原因, 导致微生物活性不同, 进而影响土壤有机氮的分配与转化。

土壤酸解铵态氮和氨基酸态氮是土壤中有效氮的“暂存库”和“缓效库”, 其含量的高低直接影响土壤供氮潜力, 可作为土壤供氮潜力的表征^[36]。本研究中, N2 处理下氨基酸态氮和酸解铵态氮含量最高, 这表明 N2 处理下土壤中活性有机氮含量较高, 即土壤供氮潜力较高。因此, 科学合理的施氮量对提高该区春小麦农田土壤供氮潜力意义重大。

3.2 土壤氮素转化酶活性对施氮量的响应

土壤酶活性是土壤生物学活性的表现, 也是衡量土壤肥力水平的重要指标, 能反映土壤养分尤其是 N、P 转化能力的强弱, 但土壤生物活性又受土壤养分状况、土壤质地等因素的影响^[41-43]。本研究中, 土壤蛋白酶和脲酶活性随施氮量的增加先增长后下降, 以 N2 处理的活性最高, 这证明氮素对酶活性的促进作用有一定的限制; 郭天财等^[42]、袁玲等^[44]和徐福利等^[45]的研究也表明, 随着施氮量的增加, 作物根系分泌物增加, 土壤微生物数量增加, 进一步促进了土壤酶活性增强, 从而提高了土壤有机氮的转化, 进而提高了土壤肥力。但如果施氮量超过一定阈值, 施氮会抑制酶活性。这可能是由于氮肥促进了作物根系代谢, 使根系分泌物增多, 微生物繁殖加快, 而根际微生物通过吸收土壤中的养分, 可以形成近根缓效供应的养分库, 有利于提高土壤酶活性^[43,46-48], 但当施氮量超过一定阈值, 过高的氮肥用量会阻碍微生物的合成作用, 导致酶活性的减弱^[30]。本研究中, 氮肥施用量在 0—105 kg N·hm⁻² 范围内均有利于提高春小麦土壤脲酶和蛋白酶活性。0—10 和 10—20 cm 土层土壤硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性随着施氮量的增加先升高后降低, 硝酸还原酶活性以 N1 最高, 亚硝酸还原酶以 N3 最高; 20—40 cm 土层不同施氮处理先降低后升高, 硝酸还原酶活性以 N2 最低, 亚硝酸还原酶以 N3 最低。已有研究表明反硝化酶活性主要受土壤温度、水分、氧气、底物浓度和有机碳含量等因素影响^[27,49], 陈哲等^[50]研究结果表明, 土壤施肥显著增加了土壤反硝化细菌的多样性和丰度, 相应提高了反硝化作用, 但闫钟清等^[27]对草地不同氮添加的研究结果与本研究的相反, 他们发现施氮会降低亚硝酸还原酶的活性, 这可能由于不同的地区、作物、栽培方式、施肥方式影响土壤 pH 和有机质含量和取样时间与方式的不同, 从而导致土壤酶活性的不同。DECHARD 等^[51]发现, 亚硝酸还原酶活性取决于介质中 NO₃⁻浓度, 与 NO₃⁻浓度呈正相关。本研究中, 硝态氮含量随土层的加深而升高, 增加了底物浓度从而改变了亚硝酸还原酶的活性。有研究发现, 土壤酶活性随着土层深度的增加而降低^[52]。这可能是由于在植物根系周围和根系及有机残体集中的土壤表层有丰富的酶释放源, 随着土层的加深植被根系减少, 有机质含量降低、土壤动物和微生物种类和数量减少, 生理活性降低, 随即酶的释放量就会降低^[53-54]。

3.3 影响土壤有机氮分布和转化的因素分析

RDA 结果显示, 土壤全氮、蛋白酶、有机碳和 C : N 是影响陇中黄土高原春小麦农田土壤有机氮组分变化的关键因子。土壤全氮的质量与数量直接影响到参与氮素矿化的微生物是否容易获得自身分解所需的能源与氮源, 进而影响到土壤氮素转化特征^[55]。在农业生态系统中, 土壤有机氮的转化过程是由理化过程和微生物过程共同作用的结果。本研究区植物可利用的活性氮库主要以有机态存在, 植物和微生物分泌的蛋白酶能将大部分的有机氮转化为可供植物吸收利用的无机氮^[56]。土壤有机碳为土壤微生物生活提供了充足的能量, 促进了微生物对土壤有机氮的矿化。碳氮比影响氮素矿化速率^[57], PRESCOTT 等^[58]认为当土壤碳氮比小于 25 : 1 时, 土壤中的氮素会出现净矿化。本研究中, 土壤碳氮比维持在较低的水平, 减弱了微生物的分解能力, 土壤有机氮组分与碳氮比呈现出负相关关系。

4 结论

氮肥合理施用是维持或提高土壤肥力的基础。在本研究中, 土壤氨基酸态氮、酸解铵态氮随着施氮量的增加先升高后降低, 均在 N₂ 处理达到最大。在此施氮模式下 N₂ 处理土壤供氮潜力最高。根据 RDA 结果可知, 全氮是影响有机氮组分变化的最重要因子, 蛋白酶次之; 碳氮比与所有有机氮组分均呈负相关, 蛋白酶、有机质和脲酶与氨基酸态氮呈极显著正相关。

References

- [1] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. 植物生态学报, 2007(2): 205-218.
LÜ C Q, TIAN H Q, HUANG Y. Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology*, 2007(2): 205-218. (in Chinese)
- [2] 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅. 宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响. 环境科学, 2019, 40(8): 3825-3832.
GAO H, XIAO L, NIU D, NI Y X, HUANG Y M. Effects of converting farmland into forest and grassland on soil nitrogen component and conversion enzyme activity at mountain area of Southern Ningxia. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3825-3832. (in Chinese)
- [3] 贾倩, 廖世鹏, 卜容燕, 张萌, 任涛, 李小坤, 丛日环, 鲁剑巍. 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.
JIA Q, LIAO S P, BU R Y, ZHANG M, REN T, LI X K, CONG R H, LU J W. Effects of nitrogen application rate on fractionation of soil organic nitrogen relative to crop rotation mode. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1547-1558. (in Chinese)
- [4] THOMAS B W, WHALEN J K, SHARIFI M, CHANTIGNY M, ZEBARTH B J. Labile organic matter fractions as early-season nitrogen supply indicators in manure-amended soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179: 94-103.
- [5] SHAHID M, NAYAK A K, PUREE C, TRIPATHI R, LAL B, GAUTAM P. Carbon and nitrogen fractions and stocks under 41 years of chemical and organic fertilization in a sub-humid tropical rice soil. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 136-146.
- [6] SCHULTEN H R, SCHNITZER M. The chemistry of soil organic nitrogen: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26: 1-15.
- [7] BREMNER J M. Organic forms of nitrogen//BLACK C A. *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Incorporation, 1965: 1148-1178.
- [8] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 王小利, 段建军, 李渝, 蒋太明, 段英华. 长期有机无机肥配施增强黄壤性水稻土有机氮的物理保护作用. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1481-1486.
ZHANG L M, XU M G, LOU Y L, WANG X L, DUAN J J, LI Y, JIANG T M, DUAN Y H. Combined application of chemical and organic fertilizers long-term increase physical protection of nitrogen in yellow paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1481-1486. (in Chinese)
- [9] LÜ H J, HE H, ZHAO J, ZHAO J, ZHANG W, XIE H, HU G Q. Dynamics of fertilizer-derived organic nitrogen fractions in an arable soil during a growing season. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 595-607.
- [10] WERDIN-PFISTERER N R, KIELLAND K, BOONE R D. Soil amino acid composition across a boreal forest successional sequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(6): 1210-1220.
- [11] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响. 中国农业科学, 2004(1): 87-91.
JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004(1): 87-91. (in Chinese)
- [12] DICK W A. Influence of long-term tillage and crop rotation combination on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 569-574.
- [13] 姜小凤, 王淑英, 丁宁平, 樊廷录, 张平良, 郭建国, 李倩, 苏敏. 施肥方式对旱地土壤酶活性和养分含量的影响. 核农学报, 2010, 24(1): 136-141.

- JIANG X F, WANG S P, DING N P, FAN T L, ZHANG P L, GUO J G, LI Q, SU M. Effect of different fertilization on soil enzyme activity and nutrients. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(1): 136-141. (in Chinese)
- [14] 王树起, 韩晓增, 乔云发, 王守宇, 李晓慧. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1311-1316.
- WANG S Q, HAN X Z, QIAO Y F, WANG S Y, LI X H. Effects of land uses and fertilization systems on soil enzyme activities and nutrients. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1311-1316. (in Chinese)
- [15] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 何维明. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. *林业科学*, 2001(4): 124-128.
- YANG W Q, ZHONG Z C, TAO J P, HE W M. Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001(4): 124-128. (in Chinese)
- [16] 丁效东, 闫慧峰, 张士荣, 陈伟贤, 郭俊杰, 魏彬, 王军. 有机肥 C/N 优化下氮肥运筹对烟株根际无机氮和酶活性的影响. *中国烟草科学*, 2016, 37(1): 26-31.
- DING X D, YAN H F, ZHANG S R, CHEN W X, GUO J J, WEI B, WANG J. The effect of nitrogen management on Nmin and enzyme activities in rhizosphere soil of flue-cured tobacco under the optimization of C/N with organic fertilizer. *Chinese Tobacco Science*, 2016, 37(1): 26-31. (in Chinese)
- [17] 李世清, 李生秀, 邵明安, 郭大勇. 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.
- LI S Q, LI S X, SHAO M A, GUO D Y. Effects of long-term application of fertilizers on soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen in semiarid farmland ecological system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 859-864. (in Chinese)
- [18] 吴汉卿, 杜世宇, 高娜, 张玉玲, 邹洪涛, 张玉龙, 虞娜. 水氮调控对设施土壤有机氮组分、全氮和矿质氮的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 212-219.
- WU H Q, DU S Y, GAO N, ZHANG Y L, ZOU H T, ZHANG Y L, YU N. Effects of water and nitrogen regulation on soil organic nitrogen fractions, total nitrogen and mineral nitrogen in greenhouse soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 212-219. (in Chinese)
- [19] TIAN J, WEI K, CONDRON L M, CHEN Z H, XU Z W, FENG J, CHEN L J. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland. *Plant and Soil*, 2017, 417(1/2): 217-229.
- [20] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 虞娜, 张玉玲. 灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响. *水土保持学报*, 2007(6): 99-104.
- JI J H, ZHANG Y L, HUANG Y, YU N, ZHANG Y L. Effect of different irrigation methods on forms and profile distribution of soil organic nitrogen in protected field. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(6): 99-104. (in Chinese)
- [21] STEVENSON F J. Nitrogen in agricultural soils. Madison Wisconsin: American Society of Agronomy, 1982.
- [22] 吴汉卿, 杜世宇, 王丹阳, 薛飞, 张玉玲, 邹洪涛, 张玉龙, 虞娜. 设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 805-813.
- WU H Q, DU S Y, WANG D Y, XUE F, ZHANG Y L, ZOU H T, ZHANG Y L, YU N. Response of soil organic nitrogen fractions and tomato yield to irrigation and nitrogen fertilization in greenhouse. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 805-813. (in Chinese)
- [23] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5021-5030.
- DANG Y A, WANG G D, LI S Q. The changing characteristics of profile distribution of soil organic nitrogen component of the typical soil types on the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5021-5030. (in Chinese)
- [24] XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Content and distribution of forms of organic N in soil and particle size fractions after long-term fertilization. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 739-745.
- [25] 付智丹, 周丽, 陈平, 杜青, 庞婷, 杨文钰, 雍太文. 施氮量对玉米/大豆套作系统土壤微生物数量及土壤酶活性的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1463-1474.
- FU Z D, ZHOU L, CHEN P, DU Q, PANG T, YANG W Y, YONG T W. Effects of nitrogen application rate on soil microbial quantity and soil enzymes activities in maize/soybean intercropping systems. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(10): 1463-1474. (in Chinese)
- [26] 李珣, 吕小红. 施氮处理对不同株型水稻品种土壤全氮含量及相关酶活性的影响. *江苏农业科学*, 2017, 45(23): 55-58.
- LI X, LÜ X H. Effects of nitrogen application on soil total nitrogen content and related enzyme activities in different plant type rice varieties. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(23): 55-58. (in Chinese)
- [27] 闫钟清, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 贺云龙, 王丽芹, 李兆林. 降水和氮沉降增加对草地土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2017, 37(9): 3019-3027.

- YAN Z Q, QI Y C, PENG Q, DONG Y S, GUO S F, HE Y L, WANG L Q, LI Z L. Effects of increased precipitation and nitrogen deposition on soil enzyme activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3019-3027. (in Chinese)
- [28] 肖新, 李英峰, 韩贻涛, 陈世勇, 史亚东, 俞浩, 汪建飞. 尿素施用量对道地药材滁菊土壤微生物活性的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 99-102.
- XIAO X, LI Y F, HAN Y T, CHEN S Y, SHI Y D, YU H, WANG J F. Effects of urea fertilizer application on soil microbial activity of Chuzhou *Chrysanthemum morifolium* Ramat. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 99-102. (in Chinese)
- [29] 鲍士旦. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and Agrochemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [30] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S Y. *Soil Enzyme And Research Method*. Beijing: China Agricultural Press, 1986. (in Chinese)
- [31] 隋跃宇, 陈一民, 焦晓光, 张锦源. 土壤蛋白酶的测定方法: CN105784695A[P]. 2016-07-20 [2019-07-21].
- SUI Y Y, CHEN Y M, JIAO X G, ZHANG G J. Determination method of soil protease: CN105784695A[P]. 2016-07-20 [2019-07-21]. (in Chinese)
- [32] 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.
- PEN L F, HAO M D, LAI L. Studies of long-term fertilization on soil organic n components I. The variation of soil organic N components of N fertilizer and its mixture. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 53-54. (in Chinese)
- [33] ROVIRA P, RAMÓN V. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*, 2002, 107(1/2): 140-141.
- [34] 沈其荣, 史瑞和. 不同土壤有机氮的化学组分及其有效性的研究. *土壤通报*, 1990(2): 54-57.
- SHEN Q R, SHI R H. Study on chemical composition and availability of organic nitrogen in different soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990(2): 54-57. (in Chinese)
- [35] KELLEY K R, STEVENSON F J. Forms and nature of organic N in soil. *Fertilizer Research*, 1995, 42(1/3): 1-11.
- [36] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 邹洪涛, 虞娜. 土壤有机氮组分研究进展. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1240-1246.
- WU H Q, ZHANG Y L, ZHANG Y L, ZOU H T, YU N. Soil organic nitrogen fractions: A review. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5): 1240-1246. (in Chinese)
- [37] 王媛, 周建斌, 梁斌, 刘东娜. 不同栽培模式和施氮量对小麦-玉米轮作体系土壤供氮特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1351-1357.
- WANG Y, ZHOU J B, LIANG B, LIU D N. Effects of different cultivation patterns and nitrogen fertilization on soil nitrogen supply of in the wheat-maize rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1351-1357. (in Chinese)
- [38] ZHANG X, WULF A. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(9): 1201-1206.
- [39] 王克鹏, 张仁陟, 索东让. 长期施肥对河西灌漠土有机氮组分及剖面分布的影响. *土壤通报*, 2009, 40(5): 1092-1097.
- WANG K P, ZHANG R Z, SUO R D. Effects of long-term fertilization on forms and profile distribution of soil organic nitrogen in irrigated desert soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1092-1097. (in Chinese)
- [40] 李萌, 王昌全, 李冰, 杨娟, 李喜喜, 游来勇, 李一丁. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响. *土壤*, 2016, 48(3): 449-454.
- LI M, WANG C Q, LI B, YANG J, LI X X, YOU L Y, LI Y D. Effects of pig manure replacing nitrogen fertilizer on soil organic nitrogen components under rice-wheat rotation. *Soils*, 2016, 48(3): 449-454. (in Chinese)
- [41] 孙波, 赵其国, 张桃林, 俞慎. 土壤质量与持续环境—III. 土壤质量评价的生物学指标. *土壤*, 1997(5): 225-234.
- SUN B, ZHAO Q G, ZHANG T L, YU S. Soil quality and sustainable environment-III. Biological indicators of soil quality assessment. *Soils*, 1997(5): 225-234. (in Chinese)
- [42] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 王永华, 谢迎新, 岳艳军, 查菲娜. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2008(1): 110-114.
- GUO T C, SONG X, MA D Y, WANG Y H, XIE Y X, YUE Y J, ZHA F N. Effects of nitrogen application rate on soil enzyme activities in wheat rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(1): 110-114. (in Chinese)
- [43] 曾艳, 周柳强, 黄美福, 黄金生, 韦运兰, 谢如林, 谭宏伟. 不同施氮量对桑园红壤耕层酶活性的影响. *生态学报*, 2014, 34(18): 5306-5310.
- ZENG Y, ZHOU L Q, HUANG M F, HUANG J S, WEI Y L, XIE R L, TAN H W. Effects of nitrogen fertilization on enzyme activities in surface layer of red soil under mulberry cultivation. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5306-5310. (in Chinese)
- [44] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 刘学成. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养

- 分的影响. 植物营养与肥料学报, 1997(4): 300-306.
- YUAN L, YANG B J, ZHENG L J, LIU X C. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and nitrogen and phosphorus nutrients. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997(4): 300-306. (in Chinese)
- [45] 徐福利, 梁银丽, 张成娥, 杜社妮, 陈志杰. 施肥对日光温室黄瓜生长和土壤生物学特性的影响. 应用生态学报, 2004(7): 1227-1230.
- XU F L, LIANG Y L, ZHANG C E, DU S N, CHEN Z J. Effect of fertilization on cucumber growth and soil biological characteristics in sunlight greenhouse. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(7): 1227-1230. (in Chinese)
- [46] CARREIRO M, SINSABAUGH R, REPERT D, PARKHURST, D. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, 81: 2359-2365.
- [47] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 黄昌勇. 红壤酶活性与肥力的关系. 应用生态学报, 2005(8): 1455-1458.
- XUE D, YAO H Y, HE Z L, HUANG C Y. Relationships between red soil enzyme activity and fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005(8): 1455-1458. (in Chinese)
- [48] AON M A, CABELLO M N, SARENA D E, COLANERI A C, FRANCO M G, BURGOS J L, CORTASSA S. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 239-254.
- [49] BARTON L, SCHIPPER L A, SMITH C T, MCALY C D A. Denitrification enzyme activity is limited by soil aeration in a wastewater-irrigated forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(5): 385-389.
- [50] 陈哲, 袁红朝, 吴金水, 魏文学. 长期施肥制度对稻田土壤反硝化细菌群落活性和结构的影响. 生态学报, 2009, 29(11): 5923-5929.
- CHEN Z, YUAN H C, WU J S, WEI W X. Activity and composition of the denitrifying bacterial community respond differently to long-term fertilization. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5923-5929. (in Chinese)
- [51] DECKARD E L, BUSCH R H. Nitrate reductase assays as a prediction test for crosses and lines in spring wheat. *Crop Science*, 1978, 18(2): 289-293.
- [52] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 赵伟峰. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变. 水土保持学报, 2007(1): 152-155.
- HUANG Y M, AN S S, QU D, ZHAO W F. Responses and evolution of soil enzymatic activities during process of vegetation recovering. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007(1): 152-155. (in Chinese)
- [53] 邹军, 喻理飞, 李媛媛. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤酶活性特征研究. 生态环境学报, 2010, 19(4): 894-898.
- ZOU J, YU L F, LI Y Y. Study on soil enzyme activity characteristics during succession of degraded karst vegetation. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 894-898. (in Chinese)
- [54] 邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 安韶山, 刘栋. 黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征. 生态学报, 2012, 32(5): 1403-1411.
- XING X Y, HUANG Y M, HUANG H B, AN S S, LIU D. Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1403-1411. (in Chinese)
- [55] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. 应用生态学报, 2004(11): 2184-2188.
- WANG C H, XING X R, HAN X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(11): 2184-2188. (in Chinese)
- [56] 谢泽宇, 罗珠珠, 李玲玲, 蔡立群, 张仁陟, 牛伊宁, 赵靖静. 黄土高原不同粮草种植模式土壤碳氮及土壤酶活性. 草业科学, 2017, 34(11): 2191-2199.
- XIE Z Y, LUO Z Z, LI L L, CAI L Q, ZHANG R Z, NIU Y N, ZHAO J J. Soil carbon and nitrogen and soil enzyme activities of different forage planting models on the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2017, 34(11): 2191-2199. (in Chinese)
- [57] ROS G H, HANEGRAAF M C, HOFFLAND E, RIEMSDIJK W H V. Predicting soil N mineralization: Relevance of organic matter fractions and soil properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(8): 1714-1722.
- [58] PRESCOTT C E, VESTERDAL H N C. Nitrogen turnover in forest floors of coastal douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital. *Ecology*, 2000, 81(7): 1878-1886.

(责任编辑 李云霞)