

# 秸秆还田和施氮量对大豆田土壤供氮能力的影响<sup>①</sup>

杨栗恒<sup>1</sup>, 尚磊<sup>1</sup>, 王孟雪<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1,2\*</sup>

(1 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163319; 2 农业农村部东北平原绿色低碳重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:** 秸秆还田以及施用氮肥是向土壤输入氮素的重要途径, 本研究解析了从秸秆还田与施氮量对大豆产量、土壤氮组分含量、酶活性和土壤供氮能力的影响, 为大豆土壤氮素养分管理提供理论依据。试验于 2022 年和 2023 年在北大荒集团九三分公司大西江农场进行, 在秸秆离田试验区设置常规施肥(N 49.2 kg/hm<sup>2</sup>, S0N2)处理, 在秸秆还田试验区分别设置不施氮肥(S1N0)处理、常规减氮 30% (N 34.4 kg/hm<sup>2</sup>, S1N1)处理、常规施氮(N 49.2 kg/hm<sup>2</sup>, S1N2)处理。结果表明, S1N2 处理较 S0N2 处理, 大豆产量显著提高了 19.15%~24.51%, 土壤氮各组分含量和土壤酶活性均有显著增加; 秸秆还田条件下增施氮肥, 对土壤全氮、硝态氮、铵态氮含量的提高有显著促进作用, 对土壤酸解总氮、酸解氨态氮、酸解氨基糖态氮、酸解氨基酸态氮和蔗糖酶活性、脲酶活性、蛋白酶活性存在“低促高抑”现象。相关性分析结果表明, 土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶活性与土壤酸解总氮、酸解氨态氮、酸解氨基酸态氮含量呈极显著正相关关系, 土壤酶活性与土壤有机态氮含量相关性最强。综上, 秸秆还田和秸秆还田条件下施氮肥均能提高大豆产量和 0–20 cm 耕层土壤供氮能力, 其中秸秆还田条件下常规减氮 30%(N 34.4 kg/hm<sup>2</sup>)在维持较高的土壤供氮能力的同时, 更有助于大豆节肥稳产。

**关键词:** 黑土; 秸秆还田; 施氮量; 土壤氮素; 酶活性

**中图分类号:** S153.6; S154.2 **文献标志码:** A

## Effects of Straw Returning and Nitrogen Application Rate on Soybean Yield, Soil Nitrogen and Enzyme Activities

YANG Liheng<sup>1</sup>, SHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Mengxue<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2 Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

**Abstract:** Straw returning and nitrogen fertilization are important pathways for nitrogen input into soil. This study investigated the effects of straw returning and nitrogen application rates on soybean yield, soil nitrogen components, enzyme activities, and soil nitrogen supply capacity, to provide theoretical basis for soil nitrogen management in soybean cultivation. The experiment was conducted at Daxijiang Farm of Jiusan Branch, Beidahuang Group in 2022 and 2023. In the straw-removed area, a conventional fertilization treatment (N 49.2 kg/hm<sup>2</sup>, S0N2) was setup. In the straw-return area, three treatments were designed: no nitrogen application (S1N0), 30% reduced conventional nitrogen (N 34.4 kg/hm<sup>2</sup>, S1N1), and conventional nitrogen application (N 49.2 kg/hm<sup>2</sup>, S1N2). The results showed that compared with S0N2, S1N2 significantly increased soybean yield by 19.15%–24.51%, with notable enhancements in topsoil nitrogen components (0–20 cm, the same below) and enzyme activities. Under straw return conditions, increased nitrogen application significantly promoted total nitrogen (TN), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents, while exhibiting a “low-promotion and high-inhibition” effect on the contents of (TAN), ammonia nitrogen (ANN), amino sugar nitrogen (ASN), and amino acid nitrogen (AAN), as well as sucrase (SUC), urease (UR), and protease (PR) activities. Correlation analysis revealed highly significant positive correlations between soil UR, SUC, and PR activities with TAN, ANN, and AAN contents, as well as strongest correlations between enzyme activities and organic nitrogen component contents. In conclusion, both straw returning and nitrogen application under straw return conditions improved soybean yield and topsoil

①基金项目: 国家重点研发计划子课题(2022YFD1000105)资助。

\* 通信作者(wangp.ycs@163.com)

作者简介: 杨栗恒(1996—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与肥料研发方面的研究。E-mail: 1124786372@qq.com

nitrogen supply capacity. The 30% reduced conventional nitrogen application (N 34.4 kg/hm<sup>2</sup>) under straw return demonstrated optimal performance in maintaining high soil nitrogen supply capacity while achieving fertilizer reduction and stable soybean yield.

**Key words:** Black soil; Straw returning; Nitrogen application rate; Soil nitrogen components; Enzyme activity

氮素是限制作物生产力的主要营养元素<sup>[1]</sup>。目前,除施用氮肥外,秸秆还田也是向土壤输入氮素的重要途径之一。外源施入氮素可能会直接或间接影响微生物活动和土壤氮素有效性,影响土壤有机氮含量和分布<sup>[2]</sup>,有效提高土壤肥力<sup>[3]</sup>。土壤有机氮占土壤全氮的 90% 以上。其结构和有效性在土壤氮的保留、矿化和氮供应中起着关键作用<sup>[4]</sup>,对维持土壤氮素肥力和供氮能力起着重要作用<sup>[5]</sup>。像氨基酸这样的小分子可以被作物完整地直接吸收。然而,大部分土壤有机氮必须先通过矿化转化为矿质氮,才能被作物吸收<sup>[6]</sup>。土壤供肥能力与土壤酶活性密切相关<sup>[7]</sup>。土壤蛋白酶、脲酶、蔗糖酶是参与土壤氮素转化的关键酶<sup>[8]</sup>,其活性高低可以反映土壤中氮素代谢的旺盛程度<sup>[9]</sup>、土壤氮素转化及供给能力的强弱<sup>[10]</sup>。

近年来,关于秸秆还田与施氮量对土壤氮素、酶活性的影响已有多项研究。如王克鹏等<sup>[11]</sup>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,但使酸解铵态氮含量降低。张玉树等<sup>[12]</sup>通过 30 年的长期定位试验表明,增施氮肥能够提高土壤全氮、酸解性氮含量。高晓宁等<sup>[13]</sup>在沈阳地区玉米-玉米-大豆轮作体系下持续 29 年的定位试验表明,化肥对耕层有机氮及其组分含量无显著影响。且秸秆碳氮比较高,还田后会直接影响土壤酶活性和微生物活动<sup>[14]</sup>,同时配施氮肥能够增强土壤微生物活动,提高土壤酶活性,促进秸秆腐解释放养分<sup>[15]</sup>。Hu 等<sup>[16]</sup>研究发现,氮肥施用对土壤酶活性、微生物群落组成和植物分泌物具有重要作用,会直接增加土壤氮素来

源。可见土壤中不同形态的有机氮组分对氮肥和秸秆还田的响应并不相同,可能受土壤类型、种植作物和气候环境等因素的影响<sup>[17]</sup>,虽然前人对秸秆还田、施氮量等对土壤氮组分,土壤酶、作物产量的影响有较多研究,但多集中在秸秆还田或施氮量单一因素下,研究结果也因地域或方法不同而存在差异,特别是在东北黑土旱作区对秸秆还田配施氮肥的相关研究更为鲜见。因此,本研究通过大田试验,立足黑龙江黑土区,以大豆为研究对象,探究秸秆还田与施氮量对土壤氮素形态、含量及酶活性的变化规律,为促进土壤肥力提升及制定精准养分管理措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2022 年和 2023 年在黑龙江省北大荒集团九三分公司大西江农场(48°58'54"N, 124°57'52"E)进行,试验区属寒温带半湿润区,无灌溉,为典型的旱作雨养农业。年平均降水量为 526.60 mm,年平均≥10℃有效积温为 2 312.50℃,降水主要集中在 7、8 月份,年平均日照时数为 2 532 h,年平均无霜期为 120 d,试验区土壤为黑土,其基本理化性质如表 1 所示。玉-豆轮作体系为该地区主要的种植制度,作物一年一熟,还田试验区自 2016—2022 年连续秸秆还田 7 年,玉米和大豆秸秆还田方式均为全量粉碎翻埋(翻埋深度 30 cm)还田,每年玉米秸秆还田量约为 8 500 kg/hm<sup>2</sup>,大豆秸秆还田量约为 2 200 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 试验地土壤基本理化性状  
Table 1 Basic soil physicochemical properties in experimental site

试验区	年份	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH
S1	2022	40.55	159.60	18.97	163.06	7.01
S1	2023	37.97	137.80	21.11	185.60	6.99
S0	2022	38.36	142.71	20.69	172.08	6.90

注: S1: 秸秆还田; S0: 秸秆离田

供试大豆品种为当地主栽品种“黑河 43”,为亚有限结荚习性。由北大荒垦丰种业股份有限公司大西江农场分公司提供种子。试验所用肥料为尿素(N 46%),重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),磷酸二铵(N 18%,

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),硫酸钾(K<sub>2</sub>O 50%)。均由北大荒集团统一供肥,各试验地块供试肥料品种均相同。秋季前茬作物收获后,进行秋起垄春施肥,肥料以机械条施的方式施入,所有肥料全部作为基肥一次性施入。

## 1.2 试验设计

试验采用大区对比法,共设置 2 个试验区,4 个处理。秸秆离田试验区:常规施肥(S0N2)处理;秸秆还田试验区:不施氮肥(S1N0)处理、常规减氮 30%(S1N1)处理、常规施氮(S1N2)处理,具体施肥措施如表 2 所示。大豆种植采用宽台大垄匀密栽培模式,每个处理 12 垄,垄长 550 m,垄宽 1.1 m,处理面积 7 260 m<sup>2</sup>。垄上 3 行种植,种植密度每公顷为 36 万株,其他田间管理措施同一般生产田。2022 年 5 月 7 日播种,9 月 29 日收获;2023 年 4 月 30 日播种,10 月 1 日收获。

## 1.3 采样与指标测定

土壤样品分别于大豆始花期(R1)、始粒期(R5)、成熟期(R8)共计 4 次取样,2022 年因疫情始粒期(R5)未取样。每处理选取 3 点,每点取耕层(0~20 cm)土

壤 2 kg,取样后一部分土样进行冷冻保存,另一部分土样风干研磨待测,用于氮组分的测定。大豆成熟期,根据种植面积、地力和大豆长势情况将试验田分成 3 个测产点。每个测产点采取对角线 5 点取样法,每个样点离地头 5 m,连续调查 10 株的单株粒数、株数,测定百粒重,并计算籽粒产量。

参照鲍士旦<sup>[18]</sup>的方法,采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N);采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N);采用凯氏定氮法(硫酸-混合催化剂消煮)测定土壤全氮(TN)。

Bremner 酸水解法<sup>[19]</sup>测土壤有机氮素含量。分为:酸解总氮(TAN),凯氏定氮法(硫酸-混合催化剂);酸解铵态氮(ANN),凯氏定氮法(MgO 浸提);酸解氨基糖态氮(ASN),凯氏定氮法(磷酸-硼砂缓冲液浸提);酸解氨基酸态氮(AAN),凯氏定氮法(硼酸-磷酸缓冲液水浴)。

表 2 各处理施肥量  
Table 2 Fertilization amount of each treatment

处理	尿素 (kg/hm <sup>2</sup> )	磷酸二铵 (kg/hm <sup>2</sup> )	重过磷酸钙 (kg/hm <sup>2</sup> )	硫酸钾 (kg/hm <sup>2</sup> )	总氮量 (N, kg/hm <sup>2</sup> )	总磷量 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , kg/hm <sup>2</sup> )	总钾量 (K <sub>2</sub> O, kg/hm <sup>2</sup> )
S0N2	46.0	156.0	0	30.0	49.2	71.8	15.0
S1N0	0	0	156.0	30.0	0	71.8	15.0
S1N1	13.7	156.0	0	30.0	34.4	71.8	15.0
S1N2	46.0	156.0	0	30.0	49.2	71.8	15.0

注: S0N2, 秸秆离田+当地常规量; S1N0, 秸秆还田+不施氮; S1N1, 秸秆还田+减 30% 氮; S1N2, 秸秆还田+当地常规量。下同。

参照关松荫<sup>[20]</sup>的方法测定,脲酶水解尿素生成的 NH<sub>3</sub>-N 在强碱性介质中与次氯酸钠和苯酚反应后产生的水溶性蓝色染料靛酚蓝在 578 nm 处吸光值,以 37 °C 条件下培养 24 h 后 1 g 土样中的 NH<sub>3</sub>-N 质量(mg)表示土壤脲酶(UR)活性;蔗糖酶催化蔗糖降解产生的还原糖与 3,5-二硝基水杨酸反应后产生的棕红色氨基化合物在 508 nm 处的吸光值,以 37 °C 条件下培养 24 h 后 1 g 土样中产生的还原糖(mg)表示土壤蔗糖酶(SUC)活性;采用酪素为基质,利用土壤蛋白酶的酶促作用把蛋白质水解成肽,肽进一步水解为氨基酸,氨基酸与茚三酮共热反应,生成蓝紫色络合物在 570 nm 处的吸光值,其颜色深浅程度与氨基酸的含量成正比,以 30 °C 条件下培养 24 h 后 1 g 土壤中氨基酸的质量(mg)表示土壤蛋白酶(PR)活性。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2021 处理数据,SPSS 17.0 进行数据分析。用 Duncan 法进行差异显著性分析,用 Origin 2021 对土壤氮组分与土壤酶活性间相关性进行分析。

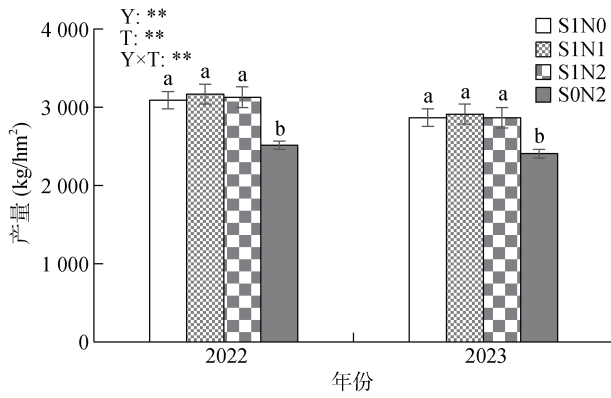
## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田与施氮量对大豆产量的影响

由图 1 可知,年份、处理和年份与处理的交互作用对大豆产量的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。从秸秆还田来看,2 年大豆产量均表现为秸秆还田(S1N2)处理显著高于秸秆离田(S0N2)处理,与 S0N2 相比,S1N2 处理大豆产量提高了 19.15%~24.51%。在秸秆还田条件下,从不同施氮量来看,2022 年和 2023 年大豆产量均在 S1N1 处理达到最大值,分别较 S1N2 处理增加了 1.21% 和 1.56%,各处理之间大豆产量无显著差异。综合 2 年试验结果表明,秸秆还田对大豆产量有显著的促进作用,在秸秆还田条件下施氮肥对大豆产量无显著影响。

### 2.2 秸秆还田与施氮量对大豆土壤全氮的影响

由图 2 可知,处理和试验年份与处理的交互作用对土壤全氮的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。从秸秆还田来看,2022 年和 2023 年秸秆还田对大豆 R1

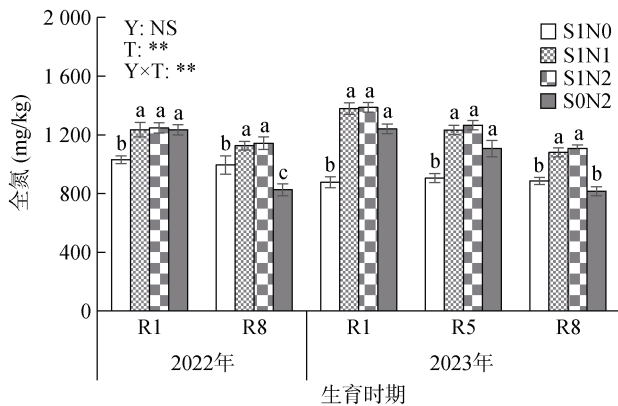


(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), Y 表示年份, T 表示处理, \*, \*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ ), 下同)

图 1 不同处理下的大豆产量

Fig. 1 Soybean yields under different treatments

和 R5 土壤全氮含量无显著影响,显著增加了大豆 R8 土壤全氮含量,分别较 S0N2 处理显著增加了 38.51% 和 35.77%。在秸秆还田条件下,从不同氮肥施用量来看,施氮肥可以显著提高大豆不同生育时期土壤全氮含量,2 年均以大豆 R1 的增加幅度最大,达到 19.82%~41.51%;2022 年和 2023 年在大豆 R1、R5 和 R8 各施氮肥处理之间土壤全氮含量无显著差异,均以 S1N2 处理最大。综合 2 年试验结果表明,秸秆还田后土壤后期氮素积累能力较强,秸秆还田条件下施用氮肥可以显著提高土壤全氮含量。



(图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), Y 表示年份, T 表示处理, NS、\*\* 分别表示影响不显著( $P>0.05$ )、极显著( $P<0.01$ ), 下同)

图 2 不同处理土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen contents under different treatments

### 2.3 秸秆还田与施氮量对大豆土壤硝态氮、铵态氮的影响

由图 3A 可知,试验年份、处理和试验年份与处理的交互作用对土壤硝态氮、铵态氮的影响均达到极显著水平( $P<0.01$ )。从秸秆还田来看,除 2022 年 R1

秸秆还田(S1N2)土壤硝态氮较秸秆离田(S0N2)显著增加了 18.49% 外,2022 年和 2023 年其他时期秸秆还田对土壤硝态氮含量均无显著影响。在秸秆还田条件下,施氮肥可以显著提高大豆不同生育时期土壤硝态氮含量,2022 年和 2023 年分别以大豆 R1 和 R5 增加幅度最大,分别达到 61.56% 和 69.70%,但 2022 年和 2023 年在大豆 R1、R5 和 R8 各施用氮肥处理之间土壤硝态氮含量无显著差异,均以 S1N2 处理达到最大值。

由图 3B 可以看出,秸秆还田对土壤铵态氮含量的影响在年际间存在差异,2022 年 R1 和 R8 土壤铵态氮含量秸秆还田(S1N2)处理显著高于秸秆离田(S0N2)处理,与 S0N2 处理相比分别增加了 19.16% 和 22.86%;土壤铵态氮含量在 2023 年各时期均表现为秸秆还田(S1N2)与秸秆离田(S0N2)处理之间无显著差异,且以秸秆还田(S1N2)处理最高。在秸秆还田条件下,土壤铵态氮含量与土壤硝态氮含量变化趋势一致,以 S1N2 处理达到最大值,施氮肥可以显著提高大豆不同生育时期土壤铵态氮含量。

### 2.4 秸秆还田与施氮量对大豆土壤酸解态氮的影响

试验年份对土壤酸解总氮的影响达到显著水平( $P<0.05$ )对酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮的影响均达到极显著水平。处理和试验年份与处理的交互作用对土壤酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮、酸解氨基酸态氮的影响均达到极显著水平( $P<0.01$ )。土壤酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮和酸解氨基酸态氮含量均表现出随施氮量的增加先升高后降低(图 4),2022 年土壤酸解总氮含量变化范围 449.31~747.19 mg/kg,酸解铵态氮含量变化范围 163.28~183.07 mg/kg,酸解氨基糖态氮含量变化范围 44.61~66.67 mg/kg,酸解氨基酸态氮含量变化范围 105.47~128.54 mg/kg,均以 S1N1 处理含量最高。2023 年土壤酸解总氮含量变化范围 469.33~655.03 mg/kg,酸解铵态氮含量变化范围 159.60~212.93 mg/kg,酸解氨基糖态氮含量变化范围 50.35~86.71 mg/kg,酸解氨基酸态氮含量变化范围 79.62~147.44 mg/kg,均以 S1N1 处理含量最高。2 年 R1 期、R5 期和 R8 期秸秆还田(S1N2)处理土壤酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮和酸解氨基酸态氮含量均高于秸秆离田(S0N2)处理。与 S0N2 处理相比,土壤酸解总氮含量分别增加了 2.03%~4.23%、9.25% 和 4.61%~20.50%,土壤酸解铵态氮含量分别增加了 2.24%~5.23%、9.06% 和 6.48%~9.53%。土壤酸解氨基糖态氮含量分

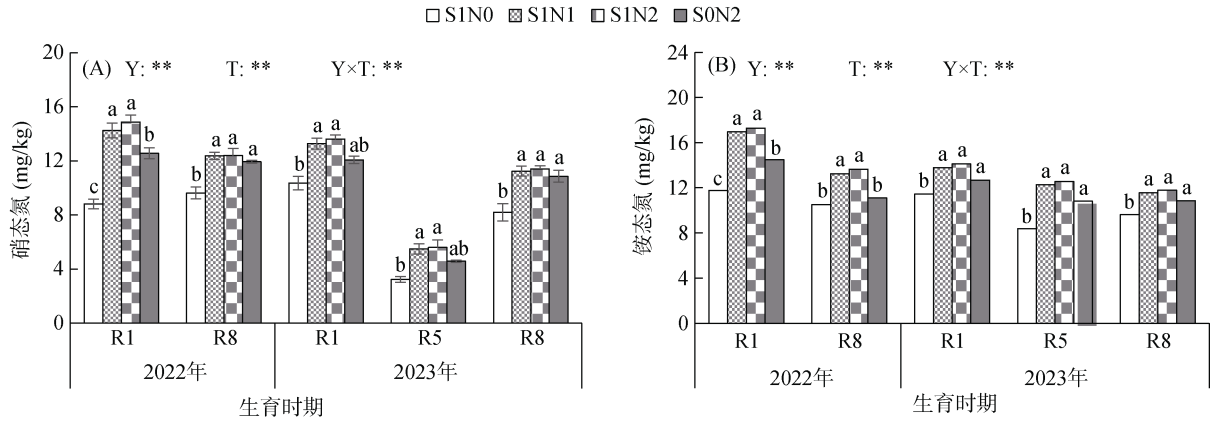


图 3 不同处理土壤硝态氮、铵态氮含量  
Fig. 3 Soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents under different treatments

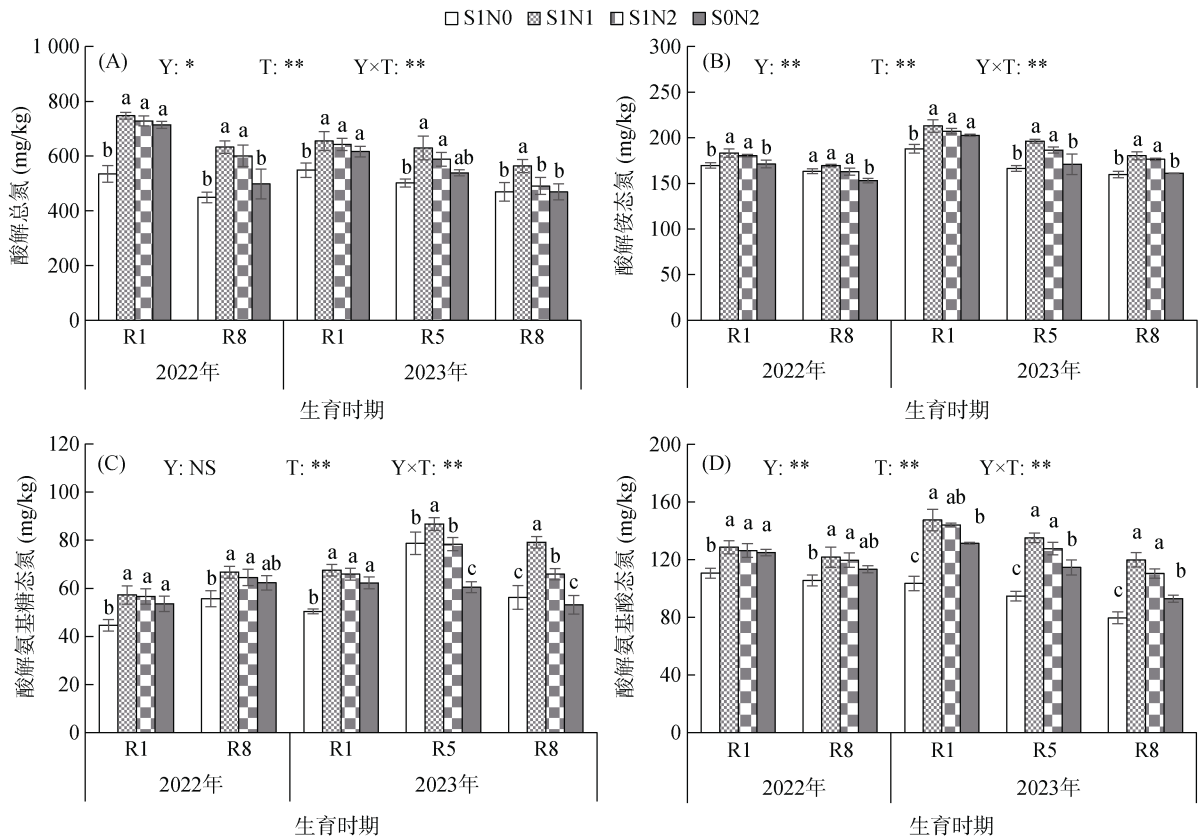


图 4 不同处理土壤酸解氮各组分含量  
Fig. 4 Contents of soil acid-hydrolyzable nitrogen components under different treatments

别增加了 5.68%~5.87%、29.76% 和 3.55%~24.05%，土壤酸解氨基酸态氮含量分别增加了 1.14%~9.78%、11.31% 和 5.56%~18.72%。

2.5 秸秆还田与施氮量对大豆土壤酶活性的影响

如图 5 所示，试验年份对土壤脲酶活性、蛋白酶活性的影响达到显著水平。处理和试验年份与处理的交互作用对土壤蔗糖酶活性、脲酶活性和蛋白酶活性的影响均达到极显著水平(P<0.01)。2 年试验结果均表现为，秸秆离田(S0N2)处理与秸秆还田(S1N2)处理

在大豆 R1 蔗糖酶活性、脲酶活性和蛋白酶活性无显著差异，R5 和 R8 期 S1N2 处理蔗糖酶活性、脲酶活性和蛋白酶活性显著高于 S0N2 处理，与 S0N2 处理相比，S1N2 处理土壤蔗糖酶活性分别增加了 13.15% 和 5.60%~10.29%，S1N2 处理土壤脲酶活性分别增加了 5.00% 和 4.55%~14.29%，S1N2 处理土壤蛋白酶活性分别增加了 10.53% 和 4.26%~5.71%。从施氮量来看，施氮处理蔗糖酶活性、脲酶活性和蛋白酶活性显著高于不施氮处理，但施氮处理间效果不显著。2

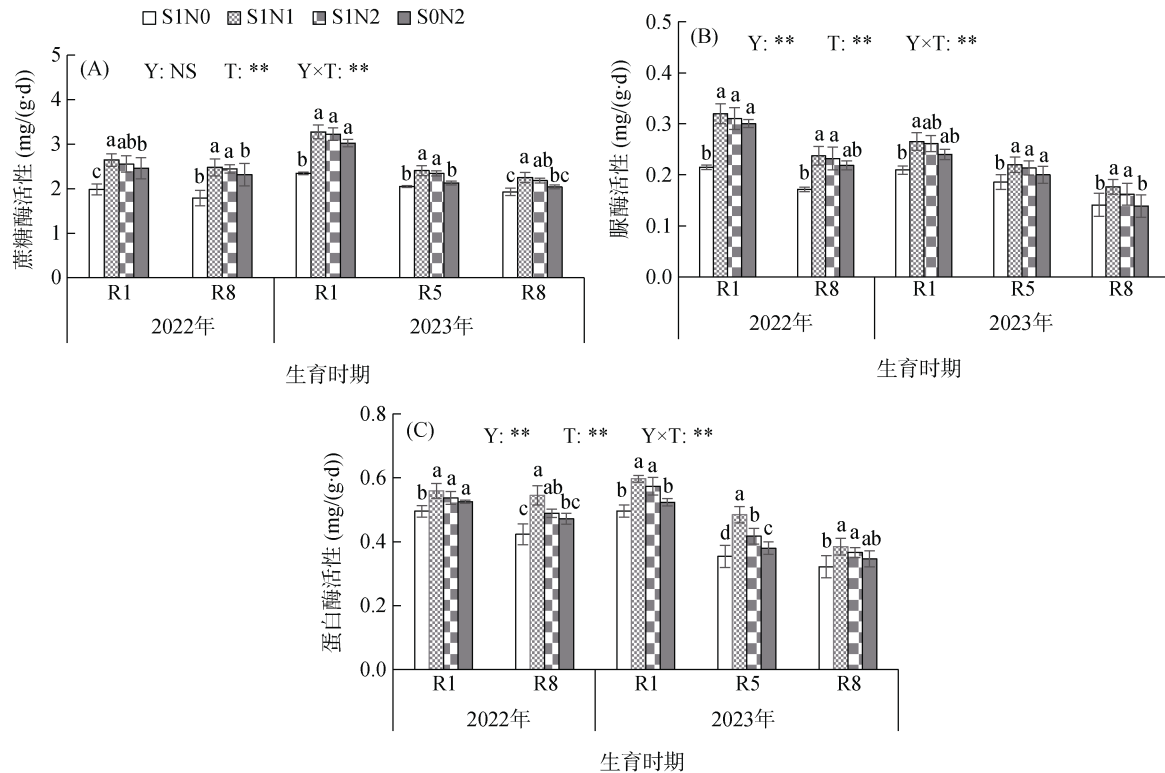


图 5 不同处理土壤酶活性

Fig. 5 Soil enzyme activities under different treatments

年 R1、R5 和 R8 均以 S1N1 处理蔗糖酶活性、脲酶活性和蛋白酶活性最高，与 S1N2 处理相比，S1N1 处理土壤蔗糖酶活性分别增加了 1.86%~3.52%、2.99% 和 1.22%~3.21%，S1N1 处理土壤脲酶活性分别增加了 3.23%~3.85%、4.76% 和 4.35%~12.50%，S1N1 处理土壤蛋白酶活性分别增加了 3.70%~5.00%、14.29% 和 10.20%~2.70%。

## 2.6 土壤氮素与酶活性相关性

由 2 年数据可知(图 6)，土壤脲酶活性与土壤全氮、酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮、硝态氮、铵态氮含量及土壤蔗糖酶、蛋白酶活性呈极显著正相关，土壤蛋白酶与酸解总氮、酸解氨基酸态氮含量呈极显著正相关，土壤蔗糖酶与酸解总氮、酸解氨基酸态氮、硝态氮含量呈极显著正相关，土壤全氮、酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮四种氮素形态间呈极显著正相关；酸解氨基糖态氮与土壤全氮、酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮、硝态氮、铵态氮含量及土壤蔗糖酶、脲酶、蛋白酶活性均未表现出相关性。

## 3 讨论

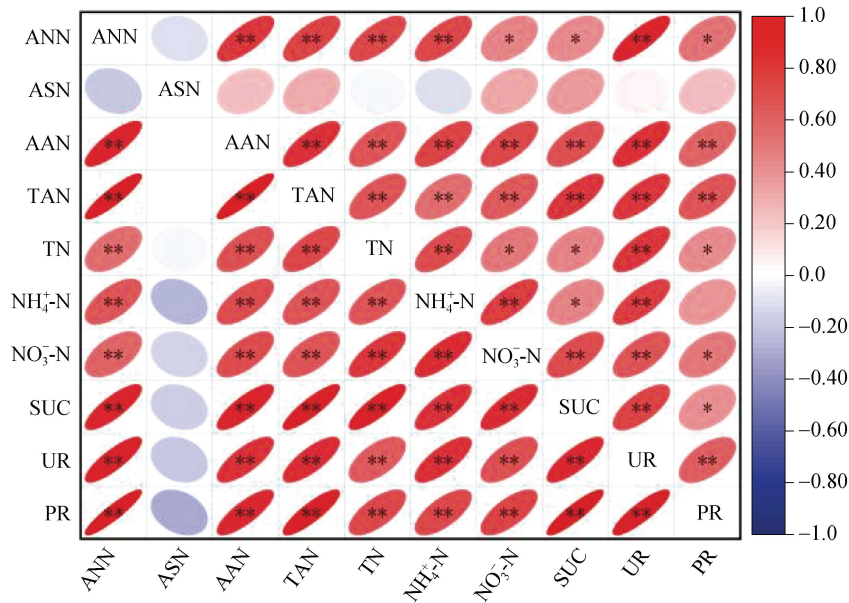
### 3.1 秸秆还田与施氮量对大豆产量的影响

长期秸秆还田可增加土壤的供氮能力，激发土壤

微生物活性，提高作物产量<sup>[21]</sup>；本研究中，与秸秆离田处理(S0N2)相比，秸秆还田处理(S1N2)大豆产量提高了 19.15%~24.51%；秸秆还田条件下，大豆产量随施氮量增加先升高后降低，常规减氮 30% (34.4 N kg/hm<sup>2</sup>, S1N1)处理产量最高为 2 912.36 kg/hm<sup>2</sup>，较常规施氮(49.2 N kg/hm<sup>2</sup>, S1N2)处理提高了 1.21%~1.56%。与 Jacimovic 等<sup>[22]</sup>研究结果一致，添加氮肥可以减轻秸秆还田的负面影响，为土壤提供有效氮，削弱营养竞争，从而提高大豆产量<sup>[23]</sup>，但在超过一定施氮量后产量增长缓慢或不再增加<sup>[24]</sup>。

### 3.2 秸秆还田与施氮量对土壤氮素的影响

秸秆还田对土壤氮素含量的增加具有促进作用<sup>[25]</sup>，本研究中，与 S0N2 处理相比，R8 期 S1N2 处理酸解总氮、酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮、酸解氨基酸态氮含量均有显著提高，增幅为 4.61%~20.50%、6.48%~9.53%、3.55%~24.05% 和 5.56%~18.72%，因为秸秆的投入为土壤微生物活动提供必需的氮，增强了土壤微生物活性，从而释放更多的氮养分<sup>[26]</sup>。秸秆还田处理硝态氮、铵态氮含量高于秸秆离田处理，一部分原因是未被作物吸收的化肥氮和秸秆氮转化为无机氮<sup>[27]</sup>，另一部分原因是秸秆作用于部分土壤微生物，促使土壤氮素向土壤无机氮转化<sup>[28]</sup>。秸秆还田条件下，增施氮肥能优化微生物群落结构及介导



(图中 ANN 表示土壤酸解氨态氮含量, ASN 表示土壤酸解氨基糖态含量, AAN 表示土壤酸解氨基糖态含量酸解氨基酸态氮, TAN 表示土壤酸解总氮含量, TN 表示土壤全氮含量, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 表示土壤铵态氮含量, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 表示土壤硝态氮含量, SUC 表示土壤蔗糖酶活性, UR 表示土壤脲酶活性, PR 表示土壤蛋白酶活性。\*、\*\*分别表示影响显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ ); 右上为 2022 年土壤氮组分相关性, 左下为 2023 年土壤氮组分相关性,  $n=24$ )

图 6 土壤氮各组分及土壤酶活性的相关性

Fig. 6 Correlation between soil nitrogen components and soil enzyme activities

氮循环功能,降低有机物矿化强度,从而增加土壤中全氮的积累<sup>[29]</sup>。但全氮含量超过一定阈值,酸解氮会逐渐降解为无机氮并被作物吸收<sup>[30]</sup>,还会转化为难于矿化的稳定态有机氮<sup>[31]</sup>,本文与其研究结果一致。本试验中 S1N2 处理土壤铵态氮、硝态氮含量均高于 S1N1 处理,与马兴华等<sup>[32]</sup>研究结果一致,其原因可能是外源氮素(秸秆和氮肥)氮素进入土壤,经土壤中酶与微生物作用转化成无机态氮储存在土壤中<sup>[33]</sup>。S1N1 处理土壤酸解铵态氮和氨基酸态氮含量较 S1N2 处理提高了 1.59%~5.20% 和 1.79%~8.60%,但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<sup>[17]</sup>。土壤酸解铵态氮和氨基酸态氮又是土壤中有效氮的“暂存库”和“缓效库”<sup>[34]</sup>,说明秸秆还田条件下减施氮肥能够提高了土壤氮素的供应强度和容量<sup>[35]</sup>。

### 3.3 秸秆还田与施氮量对土壤酶活性的影响

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 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<sup>[17]</sup>。本研究中,在大豆 R1 和 R5 秸秆还田对土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶活性影响不显著;R8 土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶活性总

的趋势是 S1N2 处理显著高于 S0N2 处理,较 S0N2 处理土壤脲酶、蔗糖酶、蛋白酶活性提高了 5.60%~10.29%、4.55%~14.29%、4.26%~5.71%。因为秸秆还田早期微生物适应期延长、活性降低,土壤酶分泌受到抑制<sup>[36]</sup>。氮肥施用可刺激土壤微生物生长,进而分泌更多的土壤酶,提高了土壤微生物活性<sup>[37]</sup>,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<sup>[17]</sup>,本研究结果与其一致,秸秆还田条件下,土壤酶活性随着施氮量的增加先增加后降低,S1N1 处理较 S1N2 处理土壤脲酶和蔗糖酶活性增加了 1.22%~3.52% 和 3.85%~12.5%,这证明氮素对酶活性的促进作用有一定的限制。土壤蛋白酶活性与土壤脲酶、蔗糖酶趋势一致,较高的土壤无机氮含量抑制了土壤有机氮向无机氮转化,从而降低了土壤蛋白酶活性<sup>[38]</sup>。综上所述,秸秆还田条件下常规减氮 30%有利于土壤活性的提高,可一定程度上提高土壤氮素供应状况<sup>[39]</sup>。

## 4 结论

氮素合理利用是维持或提高土壤肥力的基础。在本研究中,秸秆还田能显著提高大豆产量和土壤供氮能力;在秸秆还田条件下,土壤酸解氮各组分含量、土壤蛋白酶、蔗糖酶、脲酶活性以及大豆产量随着施

氮量的增加先升高后降低,均在 S1N1 处理达到最大,在此施氮模式下 S1N1 处理土壤供氮潜力最高。相关性分析表明,全氮是影响有机氮组分变化的最重要因子,土壤酸解铵态氮、酸解氨基酸态氮与土壤脲酶、蛋白酶、蔗糖酶活性呈极显著正相关。因此,秸秆还田条件下常规减氮 30%(N34.4 kg/hm<sup>2</sup>, S1N1 处理)能有效提高土壤供氮能力,实现黑龙江黑土区大豆节肥稳产的目标。

### 参考文献:

- [1] 曹平丽, 孙思怡, 卢胜旭, 等. 亚热带米楮天然林土壤有机氮组分对模拟氮沉降的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 243–249.
- [2] Nguyen T H, Shindo H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping[J]. *Agricultural Sciences*, 2011, 2(3): 213–219.
- [3] Zhou G P, Cao W D, Bai J S, et al. Co-incorporation of rice straw and leguminous green manure can increase soil available nitrogen (N) and reduce carbon and N losses: An incubation study[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(5): 661–670.
- [4] Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen[M]. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1982: 67–122.
- [5] 明玉飞, 朱桃川, 张金豪, 等. 长期种植紫花苜蓿对复垦土壤碳氮磷养分转化的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(1): 78–86.
- [6] Yang L J, Zhang L L, Geisseler D, et al. Available C and N affect the utilization of glycine by soil microorganisms[J]. *Geoderma*, 2016, 283: 32–38.
- [7] 李昌骏, 李婷, 李露露, 等. 生物质炭负载解钾菌对土壤酶活性与微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1531–1542.
- [8] Zhang Y L, Xu W J, Duan P P, et al. Evaluation and simulation of nitrogen mineralization of paddy soils in Mollisols area of Northeast China under waterlogged incubation[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171022.
- [9] 刘威, 陈小龙, 赵园园, 等. 有机肥施用对植烟土壤氮素矿化及土壤酶和微生物群落的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5): 1025–1034.
- [10] Mulvaney R L, Khan S A, Hoefl R G, et al. A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1164–1172.
- [11] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 659–666.
- [12] 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[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1981–1986.
- [13] 高晓宁, 韩晓日, 刘宁, 等. 长期定位施肥对棕壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2820–2827.
- [14] 赵颖, 周枫, 罗佳琳, 等. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 937–944.
- [15] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 295–306.
- [16] Hu Q Y, Liu T Q, Ding H N, et al. Effects of nitrogen fertilizer on soil microbial residues and their contribution to soil organic carbon and total nitrogen in a rice-wheat system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2023, 181: 104648.
- [17] 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[J]. 中国农业科学, 2020, 53(12): 2423–2434.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[J]. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 1965, 9: 1238–1255.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] 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[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741–1749.
- [22] Jaćimović G, Aćin V, Miroslavljević M, et al. Effects of combined long-term straw return and nitrogen fertilization on wheat productivity and soil properties in the wheat-maize-soybean rotation system in the pannonian plain[J]. *Agronomy*, 2023, 13(6): 1529.
- [23] Hu J, Guan X J, Liang X H, et al. Optimizing the nitrogen fertilizer management to maximize the benefit of straw returning on early rice yield by modulating soil N availability[J]. *Agriculture*, 2024, 14(7): 1168.
- [24] Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1173–1183.
- [25] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 等. 长期定位施肥对潮土有机氮组分和有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 274–280.
- [26] Wu F, Li X, Liu X M, et al. Effects of fertilization practices on the metabolic functions of soil microbial communities under subsurface irrigation with stalk composite pipe[J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 529.
- [27] Xu L, Chen H, Zhou Y, et al. Long-term straw returning improved soil nitrogen sequestration by accelerating the accumulation of amino acid nitrogen[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 362: 108846.
- [28] Sun L Y, Wu Z, Ma Y C, et al. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice-wheat rotation in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 181: 97–105.
- [29] Hati K M, Jha P, Dalal R C, et al. 50 years of continuous no-tillage, stubble retention and nitrogen fertilization enhanced macro-aggregate formation and stabilisation in a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105163.

- [30] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540.
- [31] 姬景红, 张玉龙, 黄毅, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 99–104.
- [32] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 630–634.
- [33] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65–72.
- [34] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1240–1246.
- [35] 石丽红, 唐海明, 孙耿, 等. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤酸解有机氮组分的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3345–3351.
- [36] 姚应上, 孙晓雷, 柳维扬, 等. 秸秆还田与沼液配施对盐渍化土壤养分及酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 117–126.
- [37] 王倩倩, 尧水红, 张斌, 等. 秸秆配施氮肥还田对水稻土壤酶活性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(1): 19–26.
- [38] 姬兴杰, 熊淑萍, 李春明, 等. 不同肥料类型对土壤酶活性与微生物数量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 123–127, 133.
- [39] Wang L X, Pang X Y, Li N, et al. Effects of vegetation type, fine and coarse roots on soil microbial communities and enzyme activities in eastern Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2020, 194: 104694.

(责任编辑: 王方方)