

# 棉隆熏蒸对烟草氮素吸收利用的影响

杨 绅<sup>1,2</sup>, 方文生<sup>2\*</sup>, 白庆荣<sup>1</sup>, 王秋霞<sup>2</sup>, 李 园<sup>2</sup>,  
颜冬冬<sup>2</sup>, 曹焯程<sup>2\*</sup>

(1. 吉林农业大学, 长春 130118; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 为探究棉隆熏蒸对烟草氮素吸收转化利用的影响, 本试验选取云南酸性红壤、北京碱性潮土 2 种中国典型土壤, 以本氏烟 *Nicotiana benthamiana* 为对象, 研究了棉隆熏蒸对土传病原菌防效、土壤氮素转换、根系氮素供应、植株氮空间分布及氮代谢关键酶活性的影响。结果显示, 棉隆熏蒸对 2 种供试土壤中土传病原菌镰孢属 *Fusarium* spp.、疫霉属 *Phytophthora* spp. 真菌的抑制率均超过 89%, 棉隆熏蒸显著增加了土壤铵态氮含量, 减少了硝态氮含量, 抑制了土壤硝化速率及根系硝态氮供应速率, 而促进了土壤反硝化速率及根系铵态氮供应速率。棉隆熏蒸显著降低了烟草组织总氮含量, 但增加了根、茎、叶各部位铵态氮含量, 减少了硝态氮含量, 且在酸性红壤土中更明显。棉隆熏蒸后硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶活性有不同程度增加。试验结果表明, 棉隆熏蒸通过改变根际氮素形态及含量, 进而影响根际氮素供应速率及氮代谢关键酶活性, 促进烟草根茎叶各部位硝态氮的代谢, 促进烟草生长。研究结果为棉隆的科学应用提供了理论支撑。

**关键词** 棉隆; 土壤熏蒸; 氮代谢; 氮素转换; 氮代谢酶

中图分类号: S 435.62 文献标识码: A DOI: 10.16688/j.zwbh.2023042

## Effect of dazomet fumigation on nitrogen uptake and utilization in tobacco

YANG Shen<sup>1,2</sup>, FANG Wensheng<sup>2\*</sup>, BAI Qingrong<sup>1</sup>, WANG Qiuxia<sup>2</sup>, LI Yuan<sup>2</sup>,  
YAN Dongdong<sup>2</sup>, CAO Aocheng<sup>2\*</sup>

(1. Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract** In order to explore the effects of dazomet fumigation on nitrogen uptake, conversion, and utilization, two typical Chinese soils, acidic red soil in Yunnan and alkaline tidal soil in Beijing were selected for this experiment. The effects of dazomet fumigation on soil-borne pathogens, soil nitrogen conversion, root nitrogen supply, plant nitrogen spatial distribution, and the activities of key nitrogen metabolism enzymes were studied. The results showed that the control efficacies of dazomet fumigation against the soil-borne pathogens, *Fusarium* spp. and *Phytophthora* spp. in both test soils, exceeded 89%. The fumigation significantly increased soil ammonium nitrogen content, reduced nitrate nitrogen content, inhibited soil nitrification rates, and root nitrate nitrogen supply rates, and promoted soil denitrification rates and root ammonium nitrogen supply rates. Dazomet fumigation significantly decreased the total nitrogen content in the leaf tissues, increased ammonium nitrogen content in the roots, stems, and leaves and reduced nitrate nitrogen content, especially in the acidic red loam. Following dazomet fumigation, the activities of nitrate reductase, nitrite reductase activities glutamine synthase and glutamate synthase in tobacco tissues increased to some extent. The experimental results showed that dazomet fumigation changed the morphology and content of rhizosphere nitrogen. This, in turn, affected the rhizosphere nitrogen supply rate and the activities of key enzymes in nitrogen metabolism, promoted the metabolism of nitrate nitrogen in various parts of tobacco rhizomes and leaves, ultimately promoting tobacco growth. These results provide theoretical support for the scientific application of dazomet.

**Key words** dazomet, soil fumigation, nitrogen metabolism, nitrogen conversion, nitrogen metabolism enzymes

收稿日期: 2023-02-05

修订日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(32001952, 31972313); 现代农业产业技术体系北京市创新团队(BAIC01-2023-13)

\* 通信作者 E-mail: 方文生 fws0128@163.com; 曹焯程 caoac@vip.sina.com

棉隆(dazomet, DZ)是一种应用面积最广的固体土壤熏蒸剂,施用于湿润土壤后生成活性成分异硫氰酸甲酯(methyl isothiocyanate, MITC),对土壤病原细菌、真菌、线虫及杂草均有良好的防效。

前期研究表明,土壤熏蒸剂可影响土壤中氮素形态及水平,减少硝态氮含量,提升铵态氮含量<sup>[1]</sup>。铵态氮、硝态氮是植物吸收的主要无机氮,不同形态的氮素直接影响作物生长发育。周冀衡等<sup>[2]</sup>的研究表明,氮素浓度为 3~9 mmol/L 时,铵硝比为 1:1 较 100% 硝态氮供应更能有效地增加茎、叶部干重。张玉宁<sup>[3]</sup>发现,与低浓度氮营养供给相比,较高的氮素水平可以更好地促进作物生长,增加根系、茎粗、叶片数量、鲜重及干重。但单施硝酸盐或是铵盐一段时间后根系活力均会降低,影响植株对氮素的吸收,而二者复配施用,可有效提升作物生长发育<sup>[4]</sup>。棉隆熏蒸后土壤氮素形态及含量改变,可能影响作物生长发育。

植物吸收铵态氮和硝态氮后,在硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶及其同工酶的作用下,转化为植物生长所需的氨基酸、蛋白质等。田亚男等<sup>[5]</sup>的研究表明,水培条件下,与铵硝比 1:1 相比,二者 1:3 时对杜梨幼苗长势及硝酸还原酶活性具有显著促进作用,硝酸还原酶活性增加 23.57%,而铵硝比 3:1 则会抑

制其生长发育。李海霞等<sup>[6]</sup>发现,铵硝比 3:1 可显著促进蒙古栎幼苗生物量累积,为单独铵态氮处理的 1.34 倍,单独硝态氮处理的 1.27 倍。铵态氮/硝态氮混合施用,雷竹硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性显著高于 2 种形态的氮单独施用<sup>[7]</sup>。Alexander 等<sup>[8]</sup>和 Takács 等<sup>[9]</sup>认为,不同比例的铵态氮和硝态氮配施,随着铵态氮含量占比的升高,硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的活性均显著提高。棉隆熏蒸改变土壤氮素形态的空间分布,可能进一步影响作物氮代谢关键酶的活性,最终影响作物氮吸收。

本试验选取我国 2 种典型土壤,南方酸性红壤和北方碱性潮土,以模式作物烟草作为研究对象,测定棉隆熏蒸后土壤无机氮变化、土壤硝化、反硝化速率、烟草根系氮素供应速率、烟草植株根茎叶不同部位氮素水平以及氮代谢相关酶活性,探究棉隆熏蒸对烟草氮素吸收转运利用的影响,为棉隆科学应用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验土概况

试验用土取自北京房山和云南文山,分别为碱性潮土(北京潮土)和酸性红壤(云南红壤),具体理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil used in the experiments

土壤类型 Soil type	硝态氮/ (mg/kg) NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	铵态氮/ (mg/kg) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	有效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K	pH	电导率/(μs/cm) Electrical conductivity	有机质/(g/kg) Organic matter
北京潮土 Beijing tidal soil	12.00	3.95	463.6	577	7.97	1 610	31.4
云南红壤 Yunnan red soil	3.83	3.35	13.0	166	6.01	359	29.0

### 1.2 供试材料

供试烟草:本氏烟 *Nicotiana benthamiana*,由中国农业科学院烟草研究所提供。供试药剂:98% 棉隆微粒剂,购自江苏南通施壮化工有限公司;硝酸钠、磷酸二氢钾和氯化钾,购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.3 试验设计

#### 1.3.1 熏蒸前土壤培养

将土壤过 2 mm 筛,土壤绝对含水量调整至 13%。试验前,分别用硝酸钠、磷酸二氢钾和氯化钾补充土壤氮、磷、钾养分,使氮、磷、钾的含量分别为 200、150、150 mg/kg。最后将土壤置于黑暗、25℃

环境预培养一周,待用。

#### 1.3.2 棉隆熏蒸

称取预培养一周的供试土壤 300 g 于容积为 500 mL 的玻璃广口瓶内,按 150 mg/kg 用量将棉隆与土壤混合均匀后立即用玻璃塞和白凡士林封紧瓶口,于 28℃ 避光培养 7 d,并设置不添加棉隆的空白对照。熏蒸结束后于通风良好处敞气,使残存熏蒸剂散发干净,同时采集少量土壤样品 4℃ 保存(为熏蒸后第 0 天土样),用于土壤化学参数及病原菌测定。

#### 1.3.3 烟草种植

提前将本氏烟裸种播种于塑料培养盒中,待烟

苗长至十字期(3叶)后,选取长势一致的烟苗,用蒸馏水洗净根部基质,分别移植到熏蒸与未熏蒸土壤中,每组处理20株,在移栽烟苗前对土壤进行种子萌发安全性试验。培养室温度设置为28℃,相对湿度为60%,光周期L//D=12h//12h。

### 1.3.4 样品采集

烟草移栽后第30天及第50天进行取样调查,测定烟株株高、茎粗和叶绿素含量,其中叶绿素使用手持叶绿素仪测定。根系土:仅收集烟草移栽后第30天土样,取样时将烟草植株完整拔起,先抖去与根系松散结合的土壤,然后用刷子收集与根系紧密结合的土壤,于4℃保存用于土壤氮素转化测定。烟草样品:用蒸馏水洗净烟草根、茎、叶并吸干水分后,剪下根、茎、叶各部位,一部分55℃烘干至恒重,用于测定烟草干物质及总氮,另一部分放入液氮预冷的离心管中,液氮速冻5min后,存于-80℃用于测定烟草各部位无机氮浓度及氮代谢相关酶活性。每组试验均设3个重复。

## 1.4 测定指标及方法

### 1.4.1 土壤有害生物测定

土壤镰孢属和疫霉属的数量分别采用Komada<sup>[10]</sup>和Masago<sup>[11]</sup>的方法进行分离计数。

抑制率=(对照组菌落数-处理组菌落数)/对照组菌落数×100%。

### 1.4.2 土壤理化性质测定

土壤理化指标的测定参考李酉开<sup>[12]</sup>的方法,具体如下。硝态氮、铵态氮:用KCl浸提后置于流动分析仪进行测定;有效磷:用NaHCO<sub>3</sub>浸提后再用流动分析仪检测;速效钾:用CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>浸提后置于火焰分光光度计检测;pH:用2.5:1水土比-电位法;电导率:用2.5:1水土比-电导法;有机质:用重铬酸钾滴定法。

### 1.4.3 土壤反硝化、硝化速率及根系氮供应速率测定

反硝化速率测定<sup>[13]</sup>:取10g鲜土于20mL顶空瓶中,加入去离子水至满瓶并立即密封放置于28℃避光环境后,于0h和24h进行土壤样品采集,采用KCl浸提后置于流动分析仪测定硝态氮浓度,以单位时间硝态氮的消耗量表示反硝化强度[mg/(kg·h)],以式(1)计算。式中,C<sub>0</sub>和C<sub>t</sub>分别为0h和24h硝态氮浓度。

$$V_d = \frac{C_0 - C_t}{24} \quad (1)$$

硝化速率测定<sup>[13]</sup>:取10g鲜土于20mL顶空瓶中,用无菌棉塞住瓶口,同样置于28℃避光环境后于0h和24h进行土壤样品采集,采用KCl浸提后置于流动分析仪测定铵态氮浓度,以单位时间铵态氮的消耗量表示硝化强度[mg/(kg·h)],以式(2)计算。式中,C<sub>0</sub>和C<sub>t</sub>分别为0h和24h铵态氮浓度。

$$V_n = \frac{C_0 - C_t}{24} \quad (2)$$

根际铵态氮和硝态氮供应速率利用作物根际速效氮供应模型计算<sup>[14]</sup>:

$$V_{\text{NH}_4^+} = \frac{F_{m(\text{NH}_4^+)} \times C_{r(\text{NH}_4^+)} \times r}{K_{m(\text{NH}_4^+)} + C_{r(\text{NH}_4^+)}} - V_n \quad (3)$$

$$V_{\text{NO}_3^-} = \frac{F_{m(\text{NO}_3^-)} \times C_{r(\text{NO}_3^-)} \times r}{K_{m(\text{NO}_3^-)} + C_{r(\text{NO}_3^-)}} + V_n - V_d \quad (4)$$

V为根际铵态氮或硝态氮供应速率[mg/(kg·h)],C<sub>r</sub>为根际土壤溶液铵态氮或硝态氮含量(mg/kg),V<sub>n</sub>为硝化作用速率[mg/(kg·h)],V<sub>d</sub>为反硝化作用速率[mg/(kg·h)],r为吸收氮素的根系半径,设定为0.1mm,F<sub>m</sub>和K<sub>m</sub>分别表示根系最大铵态氮/硝态氮流入量和土壤铵态氮/硝态氮传导系数<sup>[13]</sup>。

### 1.4.4 根茎叶氮含量测定

无机氮含量测定:烟草根、茎、叶经液氮充分研磨后用KCl浸提,置于流动分析仪测定根茎叶中铵态氮、硝态氮含量。

总氮测定:根茎叶各部位样品风干后、粉碎过80目筛,55℃烘干至恒重,称取50mg待测样品,用锡箔纸包裹,于元素分析仪(vario MACRO cube,德国Elementar)CN模式分析测试。

氮素积累量=干物质质量×总氮。

### 1.4.5 根茎叶氮代谢相关酶活性测定

采用BCA法蛋白含量测定试剂盒对烟草样品进行蛋白定量,在562nm测定蛋白吸光度。按试剂盒步骤提取烟草根、茎、叶中硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT),在450nm处测定吸光度。

用标准物的浓度与吸光度(OD)拟合得到标准曲线的直线回归方程,将样品的OD值代入方程,计算出样品浓度,再乘以稀释倍数,即为样品的实际浓度。

## 1.5 数据处理及分析

使用 Microsoft Excel 2010 软件进行试验数据整理,组间均值比较采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA),显著水平设置为  $\alpha = 0.05$ 。图表制作由 Origin 2017 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉隆对烟草生长发育的影响

由表 2 可知,棉隆熏蒸对烟草的生长发育有促进作用,但对不同类型土壤刺激效应不同。云南土壤种植烟草第 30 天(YN30d),熏蒸处理组烟草叶绿素含量、株高、茎粗、根长、鲜重及根、茎、叶干重均显著高于空白对照( $P < 0.05$ ),其中根、茎、叶干重分别为对照处理的 24、11、8.6 倍;第 50 天(YN50d),除叶绿素含量与空白对照无显著差异外

( $P > 0.05$ ),熏蒸组其余各生长指标均显著高于空白对照( $P < 0.05$ )。北京土壤种植烟草第 30 天(BJ30d),棉隆熏蒸组株高、叶绿素含量,根、茎干重与空白对照相比无显著差异,但茎粗、根长、鲜重、叶干重显著大于对照组;第 50 天(BJ50d),除株高、叶绿素含量与空白对照无显著差异外( $P > 0.05$ ),其余各生长指标均显著高于空白对照。可见,棉隆熏蒸对烟草生长发育的促进效应在酸性土壤中更明显,其原因可能是最适宜烟草生长的土壤 pH 为 5.5~6.5<sup>[15]</sup>。

### 2.2 棉隆熏蒸对土传病原菌的影响

由表 3 可知,棉隆处理对云南土壤及北京土壤中镰孢属和疫霉菌属真菌的抑制率均在 89%以上,这与运翠霞等<sup>[16]</sup>的研究结果一致,表明棉隆熏蒸对土传病原菌具有出色的防治效果。

表 2 棉隆熏蒸对烟草生长参数的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effect of dazomet fumigation on tobacco growth parameters

处理	株高/cm Plant height				茎粗/mm Stem diameter			
Treatment	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d
DZ	(12.50±1.30)a	(23.00±4.36)a	(13.67±1.53)a	(23.00±1.73)a	(1.26±0.08)a	(6.00±0.52)a	(3.57±0.19)a	(3.94±1.11)a
CK	(3.77±1.65)b	(7.52±0.67)b	(13.25±0.58)a	(20.00±1.41)a	(0.58±0.12)b	(2.05±0.49)b	(2.61±0.18)b	(2.85±0.57)b
处理	根长/cm Root length				叶绿素含量 SPAD			
Treatment	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d
DZ	(5.30±0.46)a	(6.40±0.59)a	(4.07±0.57)a	(4.67±0.76)a	(34.78±1.72)a	(33.33±3.15)a	(35.77±1.94)a	(36.86±2.15)a
CK	(2.47±0.72)b	(4.02±0.38)b	(2.67±0.59)b	(3.17±0.29)b	(24.64±1.71)b	(38.50±3.04)a	(38.77±1.90)a	(37.12±1.97)a
处理	整株鲜重/g Fresh weight of plant				根干重/g Dry weight of root			
Treatment	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d
DZ	(5.35±0.43)a	(13.46±1.41)a	(7.14±0.23)a	(11.77±2.73)a	(0.10±0.23)a	(0.23±0.10)a	(0.09±0.01)a	(0.17±0.02)a
CK	(0.91±0.12)b	(2.77±1.00)b	(4.49±0.77)b	(6.50±1.37)b	(0.004±0.001)b	(0.03±0.01)b	(0.06±0.02)a	(0.08±0.03)b
处理	茎干重/g Dry weight of stem				叶干重/g Dry weight of leaves			
Treatment	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d	YN30d	YN50d	BJ30d	BJ50d
DZ	(0.12±0.03)a	(0.44±0.14)a	(0.26±0.06)a	(0.35±0.10)a	(0.48±0.10)a	(1.12±0.23)a	(0.59±0.04)a	(1.26±0.16)a
CK	(0.01±0.001)b	(0.04±0.02)b	(0.23±0.04)a	(0.21±0.004)b	(0.05±0.02)b	(0.28±0.05)b	(0.41±0.06)b	(0.40±0.06)b

1) 不同小写字母表示经单因素方差分析,处理和对照间相关参数差异显著( $P < 0.05$ )。DZ: 棉隆熏蒸; CK: 空白对照; YN30d 为云南土壤种植烟草第 30 天,YN50d 为云南土壤种植烟草第 50 天,BJ30d 为北京土壤种植烟草第 30 天,BJ50d 为北京土壤种植烟草第 50 天。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences of parameters between treatment and control at 0.05 level based on One-way ANOVA ( $P < 0.05$ ). DZ: Dazomet fumigation; CK: Blank control; YN30d: The 30th day after planting tobacco in Yunnan soil; YN50d: The 50th day after planting tobacco in Yunnan soil; BJ30d: The 30th day after planting tobacco in Beijing soil; BJ50d: The 50th day after planting tobacco in Beijing soil. The same applies below.

表 3 棉隆熏蒸对不同土壤病原菌的抑制率

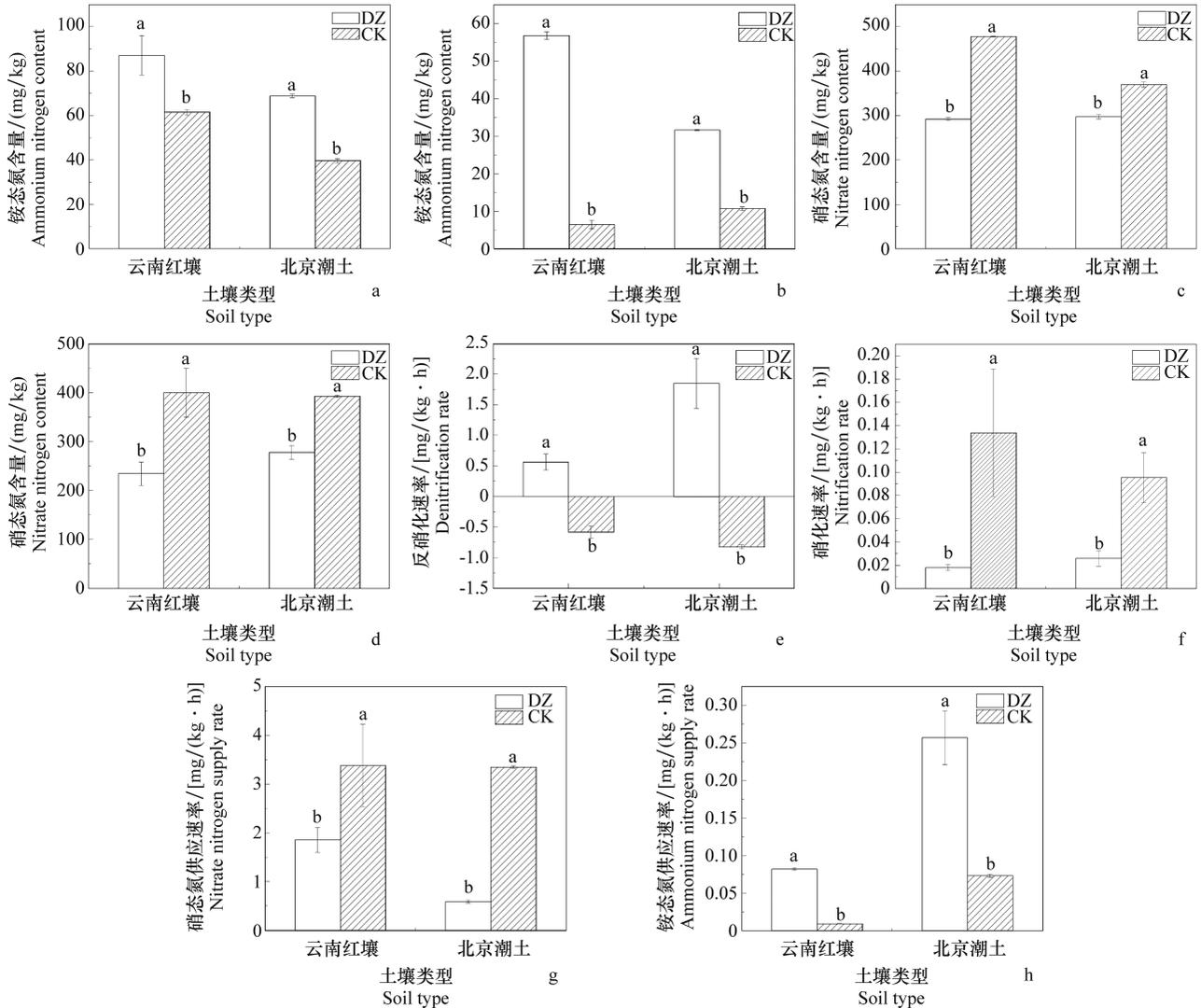
Table 3 Inhibition rates of dazomet fumigation on pathogens in different soils

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	镰孢属 <i>Fusarium</i> spp.		疫霉菌属 <i>Phytophthora</i> spp.	
		菌落数/(cfu/g) Number of colonies	抑制率/% Inhibition rate	菌落数/(cfu/g) Number of colonies	抑制率/% Inhibition rate
云南红壤 Yunnan red soil	CK	2 973.33±325.78	—	2 910.00±670.00	—
	DZ	33.33±23.09	98.88	310.00±130.00	89.35
北京潮土 Beijing tidal soil	CK	2 560.00±240.00	—	650.00±207.85	—
	DZ	160.00±40.00	93.75	40.00±20.00	93.85

### 2.3 棉隆熏蒸对根际土壤氮素转换、根系氮素供应的影响

从图 1 中可以看出,与空白对照相比,熏蒸后 2 种土壤中铵态氮含量均显著升高,而硝态氮含量则显著降低,铵硝比显著升高。在云南土中,棉隆处理后第 0 天铵态氮含量比对照增加 41.90%,硝态氮减少 38.81%,铵硝比从 0.13 提升到 0.33。北京土

中,棉隆处理后第 0 天铵态氮含量比对照增加 73.68%,而硝态氮减少 19.53%,铵硝比从 0.11 提升到 0.23。在第 30 天时促进和抑制效应依旧存在,与对照相比,熏蒸后云南土铵态氮含量增加 771.07%,硝态氮减少 41.40%,北京土中铵态氮含量增加 193.40%,硝态氮减少 29.20%,铵硝比分别从 0.02、0.03 提升到 0.24、0.11。



a: 土壤处理0 d时土壤铵态氮含量; b: 种植烟草30 d时土壤铵态氮含量; c: 土壤处理0 d时土壤硝态氮含量; d: 种植烟草30 d时土壤硝态氮含量; e: 种植烟草30 d时土壤反硝化速率; f: 种植烟草30 d时土壤硝化速率; g: 种植烟草30 d时烟草根系硝态氮供应速率; h: 种植烟草30 d时烟草根系铵态氮供应速率。柱子上方不同小写字母表示经单因素方差分析,处理和对照间相关参数差异显著( $P < 0.05$ )。DZ: 棉隆熏蒸; CK: 空白对照。  
a: Soil ammonium nitrogen content 0 d after soil treatment; b: Soil ammonium nitrogen content 30 d after planting tobacco; c: Soil nitrate nitrogen content 0 d after soil treatment; d: Soil nitrate nitrogen content 30 d after planting tobacco; e: Soil denitrification rate 30 d after planting tobacco; f: Soil nitrification rate 30 d after planting tobacco; g: Nitrate nitrogen supply rate in tobacco root 30 d after planting; h: Ammonium nitrogen supply rate in tobacco root 30 d after planting. Different lowercase letters on the bars indicate significant differences of parameters between treatment and control at 0.05 level based on One-way ANOVA. DZ: Dazomet fumigation; CK: Blank control.

图 1 棉隆熏蒸对土壤氮素转化、根系氮素供应的影响

Fig. 1 Effects of dazomet fumigation on soil nitrogen conversion and root nitrogen supply

土壤硝化反硝化速率数据(图 1)显示,云南土壤种植烟草第 30 天(YN30d),熏蒸处理组与对照处

理组相比反硝化速率增加 1.14 mg/(kg·h)、硝化速率减少 0.12 mg/(kg·h);北京土壤种植烟草第

30 天(BJ30d),熏蒸处理组与对照处理组相比反硝化反应速率增加 2.68 mg/(kg·h),硝化速率减少 0.07 mg/(kg·h)。可见,棉隆熏蒸显著促进了土壤反硝化速率,显著抑制土壤硝化速率。

土壤氮素转换导致烟草根系氮素供应速率也发生变化。烟草生长第 30 天,棉隆熏蒸组云南土中铵态氮供应速率比对照处理增加 8.07 倍,而硝态氮供应速率比对照处理减少 45.16%( $P<0.05$ );北京土中棉隆熏蒸组铵态氮供应速率比对照处理增加 2.51 倍,但硝态氮供应速率比对照处理减少 82.47%( $P$

$<0.05$ )(图 1)。可见棉隆处理显著促进根系铵态氮供应速率,而降低根系硝态氮供应速率。

## 2.4 棉隆熏蒸对烟草植株氮素含量的影响

由表 4 可知,棉隆熏蒸后烟草根系总氮在 YN30d、YN50d、BJ50d 时比对照分别减少 18.28%、22.52%、18.65%( $P<0.05$ );茎部总氮在 YN30d、YN50d、BJ50d 时比对照分别减少 25.21%、30.09%、45.68%( $P<0.05$ );叶部总氮在 BJ50d 时比对照减少了 20.94%( $P<0.05$ )(表 4)。可见,棉隆熏蒸显著降低了烟草组织总氮含量。

表 4 棉隆熏蒸后烟草根、茎、叶不同部位无机氮、总氮含量变化

Table 4 Effect of dazomet fumigation on the content of different forms of nitrogen in tobacco

处理 Treatment	总氮/% Total nitrogen			硝态氮/(mg/kg) Nitrate nitrogen			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
YN30d	DZ	(2.19±0.08)b	(3.50±0.11)b	(5.42±0.05)a	(89.77±19.31)b	(830.47±55.94)b	(1070.29±90.55)b
	CK	(2.68±0.03)a	(4.68±0.23)a	(4.80±0.02)b	(916.68±218.04)a	(1388.23±89.11)a	(1533.26±53.52)a
YN50d	DZ	(1.72±0.08)b	(1.58±0.07)b	(3.23±0.58)a	(566.11±55.15)b	(919.90±5.03)b	(1832.35±100.11)a
	CK	(2.22±0.07)a	(2.26±0.23)a	(2.94±0.68)a	(1942.46±200.37)a	(1470.65±188.71)a	(1919.08±110.37)a
BJ30d	DZ	(2.00±0.18)a	(1.86±0.34)a	(3.15±0.51)a	(179.80±60.38)b	(795.96±136.42)a	(928.28±233.13)b
	CK	(2.01±0.44)a	(1.56±0.44)a	(3.14±0.23)a	(758.61±277.61)a	(805.96±243.23)a	(1721.98±149.73)a
BJ50d	DZ	(1.57±0.12)b	(1.51±0.01)b	(3.89±0.01)b	(1730.11±365.80)a	(2728.84±228.19)a	(1916.05±140.09)a
	CK	(1.93±0.01)a	(2.78±0.03)a	(4.92±0.02)a	(431.63±93.03)b	(1307.28±39.74)b	(1033.91±121.75)b
处理 Treatment	铵态氮/(mg/kg) Ammonium nitrogen			氮素累积量/g Nitrogen accumulation			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	
YN30d	DZ	(948.22±47.58)a	(157.83±0.56)a	(114.13±10.01)a	(0.22±0.05)a	(0.47±0.01)a	(2.88±0.18)a
	CK	(622.45±56.44)b	(119.65±1.10)b	(79.74±3.44)b	(0.01±0.004)b	(0.04±0.01)b	(0.23±0.13)b
YN50d	DZ	(833.20±28.61)a	(171.58±0.49)a	(93.07±4.16)a	(0.29±0.04)a	(0.56±0.07)a	(4.13±0.06)a
	CK	(666.65±224.48)a	(88.07±10.39)b	(65.06±4.15)b	(0.05±0.02)b	(0.11±0.07)b	(1.02±0.04)b
BJ30d	DZ	(879.01±45.57)a	(156.78±5.01)a	(104.13±5.96)a	(0.20±0.01)a	(0.48±0.07)a	(1.86±0.28)a
	CK	(739.32±218.34)a	(113.49±2.90)b	(83.02±2.90)b	(0.10±0.01)b	(0.33±0.01)b	(1.28±0.14)b
BJ50d	DZ	(986.49±24.96)a	(170.58±1.69)a	(119.42±3.63)a	(0.25±0.01)a	(0.63±0.10)a	(4.89±0.61)a
	CK	(654.67±81.84)b	(114.57±15.09)b	(77.57±11.86)b	(0.16±0.04)b	(0.46±0.03)b	(2.05±0.34)b

棉隆熏蒸改变了烟草根、茎、叶各部位硝态氮的空间分布。在云南土壤中,棉隆熏蒸后烟草根系硝态氮含量在 YN30d、YN50d 时比对照分别减少 90.21%、70.86%( $P<0.05$ );茎部硝态氮含量在 YN30d、YN50d 时比对照分别减少 40.18%、37.45%( $P<0.05$ );叶部硝态氮含量在 YN30d 时比对照减少 30.20%( $P<0.05$ )。在北京土壤中,棉隆熏蒸后烟草根系及叶部硝态氮含量在 BJ30d 比对照分别减少 76.30%、46.09%( $P<0.05$ ),但根、茎、

叶部位硝态氮含量在 BJ50d 时比对照分别增加 300.83%、108.74%、85.32%( $P<0.05$ )(表 4)。可见,棉隆熏蒸对烟草硝态氮的空间分布具有显著影响,熏蒸前期(30 d)显著减少根茎叶各部位硝态氮含量,表明熏蒸显著促进了硝态氮的代谢。

棉隆熏蒸后烟草根、茎、叶部位铵态氮显著富集。如根系铵态氮含量在 YN30d、BJ50d 时比对照分别增加 52.34%、50.69%( $P<0.05$ );茎部铵态氮含量在 YN30d、YN50d、BJ30d、BJ50d 时比对照分别

增加 31.91%、94.82%、38.14%、48.89% ( $P < 0.05$ ); 叶部铵态氮含量在 YN30d、YN50d、BJ30d、BJ50d 时比对照分别增加 43.13%、43.05%、25.43%、53.95% ( $P < 0.05$ ) (表 4)。可见,棉隆熏蒸显著促进了烟草铵态氮的积累,可能是由于熏蒸加速了硝态氮的代谢,导致更多的硝态氮转化成铵态氮。

氮素累积量作为植株干物质累积量的主要成分之一,同时也是评估植株氮素吸收的重要指标<sup>[18]</sup>。在 2 种试验土壤中,棉隆熏蒸后烟草根、茎、叶的氮素累积量均显著高于空白处理,烟草根系氮素累积量在 YN30d、YN50d、BJ30d、BJ50d 时比对照分别增加 2100%、480%、100%、56.25% ( $P < 0.05$ );茎部比对照分别增加 1075%、409.09%、45.45%、36.96% ( $P < 0.05$ );叶部比对照分别增加 1152.17%、304.90%、45.31%、138.54% ( $P < 0.05$ ) (表 4)。可见,棉隆熏蒸显著促进了烟草氮素累积,且该促进作

用在云南土中作用更显著。

### 2.5 棉隆熏蒸对氮代谢相关酶活性影响

根系从土壤中吸收铵态氮和硝态氮后,通过硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶将其转化为植物可用的氨基酸。

硝酸还原酶将植株吸收的硝态氮转化为亚硝态氮,是植株氮代谢过程中的限速酶,也是硝态氮同化的起始酶<sup>[19]</sup>。棉隆熏蒸后,云南土壤中烟草叶部硝酸还原酶活性比对照增加 8.58%~10.78% ( $P < 0.05$ ),茎部只在第 50 天时显著高于对照 (高 12.52%,  $P < 0.05$ ),而在根部二者无显著差异。北京土壤中,熏蒸前期 (第 30 天),根部及茎部硝酸还原酶活性显著增加,分别比对照增加 13.77% 和 15.66% ( $P < 0.05$ ),但后期 (第 50 天) 无显著差异,而且叶部熏蒸处理和对照处理在两次采样时间均无显著差异 (表 5)。

表 5 棉隆熏蒸对烟草硝酸还原酶(NR)活性的影响

Table 5 Effect of dazomet fumigation on nitrate reductase (NR) activity in tobacco

部位 Position	硝酸还原酶活性/(IU/L) Nitrate reductase activity							
	YN30d		YN50d		BJ30d		BJ50d	
	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control
根 Root	(192.92± 7.06)a	(192.76± 3.95)a	(188.38± 10.43)a	(189.37± 9.12)a	(192.33± 12.69)a	(169.05± 3.11)b	(197.62± 8.18)a	(189.96± 2.97)a
茎 Stem	(186.85± 3.21)a	(182.99± 3.00)a	(195.32± 0.10)a	(173.58± 10.21)b	(192.67± 3.80)a	(166.58± 3.85)b	(175.27± 9.42)a	(181.60± 7.43)a
叶 Leaf	(188.17± 5.96)a	(169.86± 4.75)b	(197.36± 9.02)a	(181.76± 2.08)b	(181.81± 14.66)a	(191.67± 14.64)a	(193.79± 11.58)a	(198.02± 5.94)a

亚硝酸还原酶将硝酸还原酶同化的亚硝态氮还原为铵态氮,是硝态氮同化的关键控制酶<sup>[20]</sup>。云南土中,棉隆熏蒸前期 (第 30 天),根部和叶部亚硝酸还原酶活性显著增加,分别比对照增加 19.56% 和 5.57% ( $P < 0.05$ ),在茎部二者无显著差异;后期 (第 50 天)茎部和叶部亚硝酸还原酶活性显著增加,增加量为 6.67% 和 8.76% ( $P < 0.05$ )。北京土中,熏蒸前期 (第 30 天),根、茎、叶各部位亚硝酸还原酶活性无显著变化,但在后期 (第 50 天),根、茎、叶各部位亚硝酸还原酶活性分别比对照显著增加 17.34%、11.81%、11.90% (表 6)。

谷氨酰胺合成酶催化谷氨酸与铵态氮结合生成谷氨酰胺<sup>[21]</sup>,是植株铵态氮同化第一步反应的关键酶。棉隆熏蒸后,云南土壤中烟草根系谷氨酰胺合

成酶活性比对照增加 13.00%~13.40% ( $P < 0.05$ ),茎部只在第 50 天时显著高于对照 (高 7.02%,  $P < 0.05$ ),而在叶部无显著差异。北京土壤中,熏蒸前期 (第 30 天),根、茎、叶各部位谷氨酰胺合成酶活性分别比对照显著增加 13.99%、12.80%、3.75%,在后期 (第 50 天) 仅在叶部谷氨酰胺合成酶活性比对照增加 14.42% ( $P < 0.05$ ),根部和茎部与对照无显著差异 (表 7)。

在谷氨酸合成酶的催化下,谷氨酰胺与 2-氧代戊二酸结合生成两分子谷氨酸,其中一分子谷氨酸可作为谷氨酰胺合成酶的底物,另一分子谷氨酸可进一步合成蛋白质等含氮化合物<sup>[22]</sup>。云南土中,棉隆熏蒸前期 (第 30 天),根部谷氨酸合成酶活性与对照相比显著增加 (高 7.28%,  $P < 0.05$ ),在茎部和叶部与对照无

显著差异,熏蒸后期(第 50 天),茎部谷氨酸合成酶活性与对照相比显著增加(高 9.90%, $P<0.05$ ),但根部谷氨酸合成酶活性比对照减少 14.80%( $P<0.05$ )。同样的,在北京土中,前期(第 30 天),熏蒸促进烟草茎部和叶部谷氨酸合成酶活性(较对照高 5.99%~

14.52%, $P<0.05$ ),显著抑制根部谷氨酸合成酶活性,比对照减少 12.46%( $P<0.05$ );后期(第 50 天),根部谷氨酸合成酶活性被抑制现象消失,而对茎、叶谷氨酸合成酶活性依旧保持显著促进效果,比对照增加 2.91%~8.89%( $P<0.05$ )(表 8)。

表 6 棉隆熏蒸对烟草亚硝酸还原酶(NiR)活性的影响

Table 6 Effect of dazomet fumigation on nitrite reductase (NiR) activity in tobacco

部位 Position	亚硝酸还原酶活性/(IU/L) Nitrite reductase activity							
	YN30d		YN50d		BJ30d		BJ50d	
	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control
根 Root	(51.17± 0.91)a	(42.80± 0.09)b	(45.59± 1.72)a	(45.06± 3.44)a	(48.76± 1.01)a	(47.29± 2.37)a	(51.22± 1.81)a	(43.65± 1.87)b
茎 Stem	(50.00± 0.47)a	(51.35± 2.16)a	(47.45± 0.22)a	(44.45± 1.44)b	(48.24± 4.21)a	(47.73± 3.16)a	(48.37± 1.41)a	(43.26± 0.23)b
叶 Leaf	(46.39± 0.04)a	(43.94± 0.86)b	(49.39± 0.83)a	(45.41± 1.08)b	(45.62± 4.06)a	(49.27± 4.23)a	(53.11± 0.01)a	(47.46± 1.99)b

表 7 棉隆熏蒸对烟草谷氨酰胺合成酶(GS)活性的影响

Table 7 Effect of dazomet fumigation on activity of glutamine synthase (GS) in tobacco

部位 Position	谷氨酰胺合成酶活性/(IU/L) Glutamine synthase activity							
	YN30d		YN50d		BJ30d		BJ50d	
	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control
根 Root	(55.21± 0.80)a	(48.86± 2.16)b	(55.46± 0.20)a	(48.91± 0.84)b	(51.66± 2.21)a	(45.32± 0.71)b	(46.70± 2.95)a	(51.03± 2.03)a
茎 Stem	(46.92± 0.96)a	(49.03± 1.91)a	(48.60± 1.00)a	(45.41± 1.50)b	(52.98± 2.55)a	(46.97± 1.40)b	(48.67± 1.11)a	(49.06± 0.22)a
叶 Leaf	(47.50± 0.32)a	(47.22± 2.47)a	(46.33± 2.53)a	(50.98± 3.56)a	(52.89± 1.02)a	(50.98± 0.23)b	(52.92± 2.68)a	(46.25± 1.18)b

表 8 棉隆熏蒸对烟草谷氨酸合成酶(GOGAT)活性的影响

Table 8 Effect of dazomet fumigation on activity of glutamate synthase (GOGAT) in tobacco

部位 Position	谷氨酸合成酶活性/(IU/L) Glutamate synthase activity							
	YN30d		YN50d		BJ30d		BJ50d	
	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control	棉隆处理 Dazomet treatment	空白对照 Blank control
根 Root	(83.68± 3.50)a	(78.00± 0.72)b	(74.62± 2.14)b	(87.58± 0.93)a	(72.77± 1.44)b	(83.13± 0.29)a	(78.78± 0.35)a	(80.74± 3.95)a
茎 Stem	(87.14± 0.86)a	(86.62± 1.12)a	(88.24± 0.69)a	(80.29± 0.37)b	(75.01± 2.20)a	(70.77± 1.10)b	(79.77± 0.59)a	(73.26± 0.80)b
叶 Leaf	(81.09± 3.02)a	(81.30± 1.67)a	(81.95± 1.61)a	(80.93± 0.86)a	(83.67± 5.21)a	(73.06± 3.54)b	(72.23± 0.53)a	(70.19± 0.55)b

### 3 讨论

棉隆作为低毒、广谱、高效的土壤熏蒸剂,对土壤中病原细菌、真菌、地下害虫、萌发的杂草种子均

有良好的防治效果<sup>[23]</sup>。本试验中,棉隆熏蒸对土壤中镰孢属、疫霉属真菌均有良好的抑制效果,且促进烟草生长发育。黄石旺等<sup>[24]</sup>和秦平伟等<sup>[25]</sup>的研究结果表明,棉隆熏蒸可有效防治多种烟草病害包括

青枯病、黑胫病,且显著增加烟草株高、叶长、有效叶片数,烟草产量超出对照组 67.9 kg/667m<sup>2</sup>,增产显著。

棉隆熏蒸后土壤铵态氮含量显著增加,主要原因是熏蒸导致参与土壤氮循环的微生物结构发生了改变,从而影响了土壤氮的转换。如方文生<sup>[26]</sup>发现,棉隆熏蒸对土壤氨氧化古菌(AOA)及氨氧化细菌(AOB)具有抑制作用,短暂增加反硝化功能基因 *nirS* 和 *nirK* 丰度,导致消耗铵态氮的氨氧化过程受阻而硝态氮的消耗过程反硝化作用增强。本试验中,在北京土和云南土中,棉隆熏蒸后均显著促进了土壤反硝化速率、抑制了土壤硝化速率,致使铵态氮含量增加,硝态氮含量减少,与前人研究结果相同<sup>[27-28]</sup>。但因土壤类型不同,对其促进和抑制效果也不同。反硝化作用,也称脱氮作用,指土壤中的硝酸盐在无氧或缺氧条件下还原为氮气或一氧化二氮。试验结果显示,棉隆熏蒸对土壤反硝化作用的促进效果在北京碱性潮土中更为明显,与 Šimek 等<sup>[29]</sup>以及 Čuhel 等<sup>[30]</sup>的试验结果相同,较高的 pH 环境更有利于土壤中反硝化反应的进行以及硝酸盐的还原,这是由于碱性环境可以缓解矿物氮对微生物的限制。同时,反硝化速率的增加会导致土壤中硝酸盐含量减少,硝酸盐作为硝化反应的氧化产物,其含量的减少势必会促进土壤中硝化反应的进行,因此,与云南土壤相比,棉隆熏蒸对北京土壤的硝化反应抑制效果较弱,最终致使对土壤铵态氮含量的促进、硝态氮含量的抑制以及土壤铵硝比的提升效果在云南红壤中更为明显。

根系是植物吸收土壤中氮素的最主要器官,棉隆熏蒸对土壤氮素转化、氮素形态分布的改变,直接影响作物(特别是根系)的氮素吸收利用,试验结果表明,在云南土和北京土中,棉隆熏蒸可不同程度提升烟草组织中硝酸还原酶等 4 种氮代谢关键酶活性,促进了烟草组织硝态氮的代谢转运,铵态氮的积累以及总氮素的积累。但因土壤类型不同,其促进程度也不同,试验结果表明,与北京土壤相比,棉隆熏蒸对云南土壤烟草根、茎、叶氮素吸收代谢的促进效果更为明显,这与赵福杨等<sup>[31]</sup>和曹景林等<sup>[32]</sup>的试验结果一致,与其他类型土壤相比,种植在红壤土中的烟草总氮含量更高,烟叶质量更优。红壤土作为我国主要植烟土壤之一,适宜的土壤酸性及土壤质地更有助于烟草的生长发育;另一方面,棉隆熏蒸

对烟草根系铵态氮供应速率的促进效果在云南土壤中更为明显,而对根系硝态氮供应速率的抑制作用较弱,更高的根系硝、铵态氮供应速率也会促进烟草的氮吸收代谢,致使棉隆熏蒸对烟草根、茎、叶氮素代谢和转运的促进作用在云南红壤中更为明显。

土壤是植物的主要生长介质和重要生态因子,其供氮能力对作物氮吸收、转运以及利用有着直接影响<sup>[33]</sup>。硝态氮、铵态氮不仅作为植株吸收的主要无机氮源,同时也是重要的信号分子<sup>[34]</sup>。根系吸收土壤中的铵态氮主要由铵态氮转运蛋白(AMT)调控。分为 AMT1、AMT2 两个家族,均为高亲和氨转运蛋白<sup>[35]</sup>。根系吸收转运硝态氮主要由硝态氮转运蛋白(NRT)调控,遵循两种转运系统,低亲和转运系统(LATS)和高亲和转运系统(HATS)<sup>[36]</sup>,当硝态氮浓度较低时,高亲和转运系统起主导作用,由 NRT2 家族负责;当硝态氮浓度较高时,低亲和力转运系统开始发挥功能,主要由 NPF(NRT1/PRT FAMILY)家族负责<sup>[37]</sup>。在茶树中,低硝态氮供应下的 CsNRT2s 在根部及新梢中的表达量均有不同程度的增加,其中 CsNRT2.1 的增加趋势最为明显<sup>[38]</sup>。Sorgon 等<sup>[39]</sup>研究表明:氮饥饿处理后供应硝态氮,玉米 ZmNRT2.1 表达量显著增加,且早期在靠近根尖区域表现出更好的硝态氮吸收能力。NRT2 家族绝大多数表达位置在植株根系<sup>[40]</sup>,本试验中棉隆熏蒸通过影响烟草根系氮素供应速率,可能进一步影响了烟草氮转运蛋白(AMT、NRT)基因的表达,特别是根系硝态氮供应速率的降低,可能促进烟草高亲和硝酸盐转运蛋白基因 NRT2 家族的表达,进而促进烟草氮素的吸收。

硝酸盐被植株根系吸收后,首先通过细胞质中的硝酸还原酶(NR)将其还原为亚硝酸盐,后转运至质体并通过质体中的亚硝酸还原酶(NiR)还原为铵盐<sup>[41]</sup>。本试验中,经棉隆熏蒸的云南红壤中,烟草生长前期(第 30 天)和生长后期(第 50 天)根、茎、叶的硝态氮含量均显著降低,与烟草茎、叶中 NR、NiR 活性显著提高相一致,表明熏蒸导致硝酸及亚硝酸还原酶活性提高,促进了烟草植株硝态氮的代谢。NR、NiR 作为(亚)硝酸根分解酶,其活性可直接判定植株同化硝态氮速率,我们的结果表明,棉隆熏蒸对烟草硝态氮同化具有显著促进作用。

植株体内的硝酸盐被 NR、NiR 还原为铵盐后,同根系从土里直接吸收的铵盐一起,通过谷氨酰胺合成酶(GS)与谷氨酸合成酶(GOGAT)转化为谷氨酰胺后,被植株进一步转运利用<sup>[21]</sup>。研究表明,GS/GOGAT 循环为正常环境下高等植物同化铵态氮的唯一途径<sup>[42]</sup>,其活性可直接表征植株同化铵态氮速率。本试验中,尽管棉隆熏蒸后烟草根、茎、叶中 GS、GOGAT 活性均显著提高,但 2 种土壤中烟草根、茎、叶的铵态氮含量均显著升高,表明铵态氮的累积量大于其代谢量。棉隆熏蒸后云南土及北京土中烟草根系铵态氮供应速率分别为对照处理的 8.07 倍和 2.50 倍,可能导致烟草铵态氮吸收量加大;另一方面,熏蒸加速了硝态氮的代谢,导致了更多的硝态氮转化成铵态氮。故尽管棉隆熏蒸促进了烟草各部位 GS、GOGAT 活性,一定程度上促进了铵态氮的代谢,但铵态氮的吸收及其他来源增加,导致烟草根、茎、叶中铵态氮含量增加的现象。

棉隆熏蒸影响烟草根系氮供应速率,提升烟草氮代谢相关酶活性,促进了烟草氮素吸收转运利用,显著提升 2 种土中烟草根、茎、叶各部位干物质质量及氮素累积量,但烟草总氮整体低于空白对照,可能是因为棉隆熏蒸刺激烟草生长发育,产生稀释效应。当植株生长发育被显著促进时,会出现稀释效应,体内养分含量被稀释,致使作物干物质质量及产量与营养元素浓度呈反比<sup>[43]</sup>,如施肥、灌溉等产生的产量增加往往会降低植物中营养元素的浓度。Hughes 等<sup>[44]</sup>的研究发现,种植红树莓,增施磷肥后,红树莓干物质质量增加 119%,但其体内氮、钾、钙、镁等矿质元素降低 22%~55%。Fainham 等<sup>[45]</sup>的研究表明,种植西蓝花的低产和高产品种,其产量的增加会导致西蓝花体内矿物质和蛋白质浓度降低。棉隆熏蒸后烟草体内含有更多的绝对矿质元素,但因烟草长势的促进使这些物质被充分稀释,最终致使烟草总氮百分比低于对照处理。

## 4 结论

本试验表明,在 2 种典型土壤(酸性红壤和碱性潮土)中,棉隆熏蒸均可显著促进烟草根茎叶各部位氮代谢,进而促进烟草生长发育。一方面,棉隆熏蒸通过影响土壤氮素转化,改变土壤铵态氮及

硝态氮水平,进而影响烟草根系氮素供给速率。另一方面,棉隆熏蒸促进烟草组织硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶活性,加速了硝态氮的代谢。本研究明确了棉隆熏蒸对作物氮素吸收利用的影响,为熏蒸后氮肥的科学利用提供了参考。

## 参考文献

- [1] FANG Wensheng, YAN Dongdong, WANG Xianli, et al. Responses of nitrogen-cycling microorganisms to dazomet fumigation [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2529. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02529.
- [2] 周冀衡,朱显灵,汪邓民.不同氮肥形态、浓度对烟草生长和钾素吸收影响的研究[J].*中国烟草学报*,1996(1):70-73.
- [3] 张玉宁.高、低硝态氮营养条件下烟草根系的转录组学分析[D].郑州:河南农业大学,2020.
- [4] 杨秋云,王国峰,黄向东,等.氮素形态和氮水平对烟草氮、磷、钾、氯积累分配的影响[J].*河南农业科学*,2011,40(8):104-109.
- [5] 田亚男,陈国栋,吴潇,等.不同硝铵配比对杜梨幼苗生长和生理特性的影响[J].*中国南方果树*,2017,46(2):26-30.
- [6] 李海霞,邢亚娟,李正华,等.不同氮素形态对蒙古栎幼苗生长及生理特性的影响[J].*森林工程*,2021,37(2):35-40.
- [7] 叶莉莎,陈双林.氮素形态及配比对雷竹光合特性和氮代谢酶活性的影响[J].*生态学杂志*,2016,35(9):2355-2360.
- [8] ALEXANDER K, MILLER M, BEAUCHAMP E. The effect of an  $\text{NH}_4^+$ -enhanced nitrogen source on the growth and yield of hydroponically grown maize (*Zea mays* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1991, 14(1): 31-44.
- [9] TAKÁCS E, TÉCSI L. Effects of  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  ratio on photosynthetic rate, nitrate reductase activity and chloroplast ultrastructure in three cultivars of red pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1992, 140(3): 298-305.
- [10] KOMADA H. Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil [J]. *Review of Plant Protection Research*, 1975, 8: 114-124.
- [11] MASAGO H. Selective inhibition of *Pythium* spp. on a medium for direct isolation of *Phytophthora* spp. from soils and plants [J]. *Phytopathology*, 1977, 77(3): 425-428.
- [12] 李西开.土壤农化分析结果计算式的正确表达[J].*土壤通报*,2000(6):275-276.
- [13] KRONZUCKER H J, SIDDIQI M Y, GLASS A D, et al. Nitrate-ammonium synergism in rice. A subcellular flux analysis [J]. *Plant Physiology*, 1999, 119(3): 1041-1046.
- [14] KIRK G, KRONZUCKER H. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants; a modelling study [J]. *Annals of Botany*, 2005, 96(4): 639.

- [15] 许自成, 王林, 肖汉乾. 湖南烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系[J]. 中国生态农业学报, 2008(4): 830-834.
- [16] 运翠霞, 严昌荣, 徐明泽, 等. 不同消毒方式对土壤酶活性及土传病原真菌消减的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(12): 86-96.
- [17] 张庆华, 曾祥国, 韩永超, 等. 土壤熏蒸剂棉隆和生物菌肥对草莓连作土壤真菌多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2018, 45(5): 1048-1060.
- [18] 戚燕强, 郑听, 张子雄, 等. 白芨不同器官干物质积累及氮、磷、钾化学计量特征[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3): 157-162.
- [19] 韩锦峰, 史宏志, 官春云, 等. 不同施氮水平和氮素来源烟叶碳氮比及其与碳氮代谢的关系[J]. 中国烟草学报, 1996(1): 19-25.
- [20] 王玉波, 李彩凤, 马凤鸣, 等. 氮磷钾对甜菜硝酸还原酶与亚硝酸还原酶的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(5): 803-808.
- [21] 王嘉文, 吴刚, 徐云敏. 谷氨酰胺合成酶在植物氮同化及再利用中的研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(4): 1373-1377.
- [22] 牛超, 刘关君, 曲春浦, 等. 谷氨酸合成酶基因及其在植物氮代谢中的调节作用综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 10-16.
- [23] 李军见, 王培. 棉隆处理土壤克服设施草莓连作障碍效果评价[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(10): 64-66.
- [24] 黄石旺, 王锡春, 周雨, 等. 土壤熏蒸对烟草土传病害的防控效果研究[J]. 湖南农业科学, 2021(11): 59-61.
- [25] 秦平伟, 陈代明, 陈瑜欣, 等. 棉隆不同年限熏蒸对烟草生长及青枯病发生的影响[J]. 植物医生, 2021, 34(2): 41-45.
- [26] 方文生. 土壤熏蒸对氮循环功能微生物及  $N_2O$  生成的影响与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [27] SPOKAS K, WANG Dong, VENTEREA R. Greenhouse gas production and emission from a forest nursery soil following fumigation with chloropicrin and methyl isothiocyanate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 475-485.
- [28] YAN Dongdong, WANG Qing, MAO Liangang, et al. Interaction between nitrification, denitrification and nitrous oxide production in fumigated soils [J]. Atmospheric Environment, 2015, 103: 82-86.
- [29] ŠIMEK M, COOPER J. The influence of soil pH on denitrification; progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 345-354.
- [30] ČUHEL J, ŠIMEK M. Proximal and distal control by pH of denitrification rate in a pasture soil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 230-233.
- [31] 赵福杨, 张耸, 钱宇, 等. 不同土壤类型对烤烟化学成分及其协调性的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(20): 38-41.
- [32] 曹景林, 林国平, 周应兵, 等. 皖南不同地貌和不同类型土壤香料烟质量特征分析[J]. 中国烟草科学, 2000(3): 27-30.
- [33] MATSUMOTO S, AE N. Characteristics of extractable soil organic nitrogen determine using various chemical solutions and its significance for nitrogen uptake by crops [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50(1): 1-9.
- [34] WANG Rongchen, OKAMOTO M, XING Xiujian, et al. Microarray analysis of the nitrate response in *Arabidopsis* roots and shoots reveals over 1000 rapidly responding genes and new linkages to glucose, trehalose-6-phosphate, iron, and sulfate metabolism [J]. Plant Physiology, 2003, 132(2): 556-567.
- [35] MASCLAUX-DAUBRESSE C, DANIEL-VEDELE F, DECHORGNAT J, et al. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture [J]. Annals of Botany, 2010, 105(7): 1141-1157.
- [36] OKAMOTO M, KUMAR A, LI Wenbin, et al. High-affinity nitrate transport in roots of *Arabidopsis* depends on expression of the NAR2-like gene *AtNRT3.1* [J]. Plant Physiology, 2006, 140(3): 1036-1046.
- [37] WANG Kai, HE Junna, ZHAO Yang, et al. EAR1 negatively regulates ABA signaling by enhancing 2C protein phosphatase activity [J]. The Plant Cell, 2018, 30(4): 815-834.
- [38] 李婧, 左欣欣, 赵培伶, 等. 茶树高亲和硝酸盐转运蛋白家族基因 *NRT2* 的鉴定与表达[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 50-56.
- [39] SORGONA A, LUPINI A, MERCATI F, et al. Nitrate uptake along the maize primary root: an integrated physiological and molecular approach [J]. Plant, Cell & Environment, 2011, 34(7): 1127-1140.
- [40] FILLEUR S, DANIEL-VEDELE F. Expression analysis of a high-affinity nitrate transporter isolated from *Arabidopsis thaliana* by differential display [J]. Planta, 1999, 207(3): 461-469.
- [41] LIU Xiujie, HU Bin, CHU Chengcai. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects [J]. Journal of Genetics and Genomics, 2022, 49(5): 394-404.
- [42] LEA P J, MIFLIN B J. Glutamate synthase and the synthesis of glutamate in plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2003, 41(6/7): 555-564.
- [43] DAVIS D R. Declining fruit and vegetable nutrient composition; what is the evidence? [J]. HortScience, 2009, 44(1): 15-19.
- [44] HUGHES M, CHAPLIN M H, MARTIN L W. Influence of mycorrhiza on the nutrition of red raspberries [J]. HortScience, 1979, 14(4): 521-523.
- [45] FARNHAM M W, GRUSAK M A, WANG Min. Calcium and magnesium concentration of inbred and hybrid broccoli heads [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2000, 125(3): 344-349.