

# 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加与氮肥对棉花生物量、氮吸收量及土壤脲酶活性的影响\*

吕宁<sup>1</sup> 尹飞虎<sup>1\*</sup> 陈云<sup>2</sup> 高志建<sup>2</sup> 刘瑜<sup>2</sup> 石磊<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>新疆农垦科学院, 新疆石河子 832000; <sup>2</sup>新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆石河子 832000)

**摘要** 试验设置半开顶式 CO<sub>2</sub> 人工气候室, 研究了不同 CO<sub>2</sub> 浓度处理 (360、540 μmol · mol<sup>-1</sup>) 与施氮(N)量(0、150、300 和 450 kg · hm<sup>-2</sup>)对棉花干物质的积累与分配、氮素吸收量及土壤脲酶活性的影响. 多样性指数和主成分分析表明: 各施 N 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度增加下棉花蕾、茎、叶和整株的总干物质积累量显著增加; 2 个 CO<sub>2</sub> 浓度下, 300 kg · hm<sup>-2</sup> N (N<sub>300</sub>) 处理棉花蕾、茎、叶、根及整株干物质质量显著高于其他 3 个 N 肥处理, 合理的氮肥施用可显著提高棉花干物质积累量. 棉花蕾和茎的氮素吸收量受 CO<sub>2</sub> 浓度影响显著, 与 360 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度相比, CO<sub>2</sub> 浓度为 540 μmol · mol<sup>-1</sup> 条件下蕾和茎的氮含量显著增加, 其中 N<sub>300</sub> 处理下蕾的氮含量最高, N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理茎的氮含量高于 N<sub>0</sub> 和 N<sub>450</sub> 处理; 叶的氮素吸收量受 CO<sub>2</sub> 和 N 的交互作用影响显著, 在 N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 处理下, 540 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度下叶的氮含量增加; 棉花根的氮素吸收量受施 N 量的影响显著, 540 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度下根的氮含量随着施 N 量的增加显著增加. 总体上, 540 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度下棉花的氮素吸收量高于 360 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度, 各 CO<sub>2</sub> 和 N 组合处理下, 棉花各器官的氮素积累量蕾铃最高, 叶片居中, 其次是茎秆, 根系最低. 各施 N 水平下, 两个土层的土壤脲酶活性随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高而显著增加; 不同 CO<sub>2</sub> 浓度处理下, 0~20 cm 土层土壤脲酶活性随着施 N 量的增加而增加, 20~40 cm 土层 N<sub>300</sub> 处理下的土壤脲酶活性高于其他 N 肥处理; CO<sub>2</sub> 和 N 互作下, 0~20 cm 土层土壤脲酶活性的平均值显著高于 20~40 cm 土层. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 540 μmol · mol<sup>-1</sup>、氮肥施用量为 300 kg · hm<sup>-2</sup> 可显著提高棉花干物质积累量和氮素吸收量.

**关键词** 棉花; CO<sub>2</sub> 浓度; 氮肥; 生物量; 氮吸收; 土壤脲酶活性

文章编号 1001-9332(2015)11-3337-08 中图分类号 S162.5, S181 文献标识码 A

**Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and nitrogen application on cotton biomass, nitrogen utilization and soil urease activity.** LYU Ning<sup>1</sup>, YIN Fei-hu<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>2</sup>, GAO Zhi-jian<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>, SHI Lei<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; <sup>2</sup>Institute of Field Water Conservancy, Soil and Fertilizer Research, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(11): 3337-3344.

**Abstract:** In this study, a semi-open-top artificial climate chamber was used to study the effect of CO<sub>2</sub> enrichment (360 and 540 μmol · mol<sup>-1</sup>) and nitrogen addition (0, 150, 300 and 450 kg · hm<sup>-2</sup>) on cotton dry matter accumulation and distribution, nitrogen absorption and soil urease activity. The results showed that the dry matter accumulation of bud, stem, leaf and the whole plant increased significantly in the higher CO<sub>2</sub> concentration treatment irrespective of nitrogen level. The dry matter of all the detected parts of plant with 300 kg · hm<sup>-2</sup> nitrogen addition was significantly higher than those with the other nitrogen levels irrespective of CO<sub>2</sub> concentration, indicating reasonable nitrogen fertilization could significantly improve cotton dry matter accumulation. Elevated CO<sub>2</sub> concentration had significant impact on the nitrogen absorption contents of cotton bud and stem.

\* 国家自然科学基金项目(40973061)、公益性行业农业科研专项(20120312)、国家高技术研究发展计划重大专项(006AA100218)和新疆生产建设兵团重大科技攻关项目(GKB00NKYJ12NY)资助。

\* \* 通讯作者. E-mail: nkyyfh@sohu.com

2014-12-19 收稿, 2015-08-10 接受。

Compared to those under  $\text{CO}_2$  concentration of  $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , the nitrogen contents of bud and stem both increased significantly under  $\text{CO}_2$  concentration of  $540 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . The nitrogen content of cotton bud in the treatment of  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen was the highest among the four nitrogen fertilizer treatments. While the nitrogen contents of cotton stem in the treatments of  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen levels were higher than those in the treatment of  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen levels. The nitrogen content of cotton leaf was significantly influenced by the interaction of  $\text{CO}_2$  elevation and N addition as the nitrogen content of leaf increased in the treatments of 0, 150 and  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen levels under the  $\text{CO}_2$  concentration of  $540 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ . The nitrogen content in cotton root was significantly increased with the increase of nitrogen fertilizer level under elevated  $\text{CO}_2$  ( $540 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) treatment. Overall, the cotton nitrogen absorption content under the elevated  $\text{CO}_2$  ( $540 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) treatment was higher than that under the ambient  $\text{CO}_2$  ( $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) treatment. The order of nitrogen accumulation content in organs was bud>leaf>stem >root. Soil urease activity of both layers increased significantly with the elevation of  $\text{CO}_2$  concentration in all the nitrogen treatments. Under each  $\text{CO}_2$  concentration treatment, the soil urease activity in the upper layer (0–20 cm) increased significantly with nitrogen application, while the urease activity under the application of  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen was highest in the lower layer (20–40 cm). The average soil urease activity in the upper layer (0–20 cm) was significantly higher than that in the lower layer (20–40 cm). This study suggested that the cotton dry matter accumulation and nitrogen absorption content were significantly increased in response to the elevated  $\text{CO}_2$  concentration ( $540 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) and higher nitrogen addition ( $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ).

**Key words:** cotton;  $\text{CO}_2$  concentration; nitrogen fertilizer; biomass; nitrogen absorption; soil urease activity.

人类工业活动引起  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等气体的大量排放,导致全球气候变暖.大气中  $\text{CO}_2$  浓度增加不仅带来全球气候变化,也深刻影响着陆地生态环境<sup>[1-3]</sup>,  $\text{CO}_2$  浓度增加通过影响光合作用而引起植物的生理代谢发生变化,通过根系分泌物间接造成土壤生态环境的变化,而这些变化也正是植物对气候极端变化所作出的一种响应<sup>[4-7]</sup>,其变化特点与适应机理成为诸多生态学者关注的热点.

植物对  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应程度与外界营养水平密切相关<sup>[8-9]</sup>.氮素(N)是构成植物有机体和进行生物地球化学循环的关键元素,氮素的营养供给对作物生长发育、产量和品质具有重要的影响<sup>[10-12]</sup>.不同光合类型植物对  $\text{CO}_2$  浓度升高做出的氮代谢响应存在差异.许振柱<sup>[13]</sup>研究表明, $\text{CO}_2$  浓度增加则植物组织中的氮含量下降,其中,柠条、扬柴叶片氮含量分别降低了 10.4%和 5.1%,主要原因是植株中积累了较多的碳水化合物稀释了氮素含量.门中华等<sup>[14]</sup>和许育彬<sup>[15]</sup>研究发现, $\text{CO}_2$  升高使得小麦氮代谢增强,植株内氮含量显著升高.一些学者研究发现,FACE(free-air  $\text{CO}_2$  enrichment)条件下,N在水稻叶和茎中的分配降低,在穗中的分配增加<sup>[16-17]</sup>.

土壤酶是土壤生态系统代谢的重要催化物质,

其活性高低可反映土壤营养物质转化、能量代谢等过程能力的强弱<sup>[18]</sup>.目前,有关土壤酶活性对大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应研究,由于受供试土壤特性、供试植物种类及土壤酶本身的敏感性、易变性等因素的影响,还没有得出一致的结论.苑学霞等<sup>[19]</sup>以 FACE 为平台,研究稻麦轮作系统中大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对土壤酶活性的影响时发现,在低氮和常氮施肥处理下大气  $\text{CO}_2$  浓度升高显著增加了土壤脲酶活性,而对土壤酸性磷酸酶活性没有明显影响,在高氮水平下大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对土壤脲酶活性未产生显著影响.陈利军等<sup>[20]</sup>研究发现,FACE 条件下,水稻生长中期(8月)、盛期(9月)0~5 cm 土层土壤脲酶活性与对照相比显著增加,5~10 cm 土层脲酶活性没有显著差异.大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对草地生态系统的土壤硝化酶和反硝化酶活性几乎不产生影响<sup>[21]</sup>.

不同的植物对  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应机制不同.各国科学家和学者通过采用 OTC 和 FACE 等控制试验,在水稻、小麦、黄瓜、西红柿,还有一些特色林果上开展了相关研究,探讨了不同  $\text{CO}_2$  浓度下植物的形态结构、生长发育、生理生态及土壤环境的响应与适应机制,取得了一定的研究成果<sup>[22-24]</sup>.棉花是对  $\text{CO}_2$  浓度升高最为敏感的  $\text{C}_3$  植物之一,有关  $\text{CO}_2$  浓度升高对棉花影响的研究较少,在试验设计上也

缺乏 C、N 等的交互作用研究. 鉴于此, 本文通过设置不同 CO<sub>2</sub> 浓度与 N 肥处理, 探讨滴灌棉田生态环境下棉花生长、养分代谢及土壤脲酶活性变化对 CO<sub>2</sub> 浓度与 N 肥的响应机制, 旨在为大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高下棉田合理施肥提供依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于 2012 年在新疆农垦科学院半封闭开顶式气候室内进行. 该区年降水量 125.0~207.7 mm, 年蒸发量 1946 mm, 年均气温 7.5~8.2 °C, 年日照时间 2526~2874 h, 生长季日照时数为 1900~2000 h, 年无霜期 160 d 左右, ≥10 °C 的活动积温为 3570~3729 °C. 供试土壤类型为灰漠土, 质地中壤, 土壤耕层(0~40 cm)有机质含量为 6.34 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 37 g·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 17.5 g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 101 g·kg<sup>-1</sup>, pH 值为 8.3. 供试棉花品种为新陆早 33 号. 供试 CO<sub>2</sub> 气体(钢瓶装)由石河子天港乙炔厂生产.

### 1.2 试验装置

试验设置半封闭开顶式人工气候室, 各小区(气室)四周用透光塑料膜(大棚用蓝膜)包围, 膜高 1.5 m. 气室外部用软管连接 CO<sub>2</sub> 气体钢瓶与小区(气室)内部滴灌带, 通过均匀分布的滴灌带滴头释放气体. CO<sub>2</sub> 气体输入通过 CO<sub>2</sub> 减压流量阀控制, 内部浓度通过呈 S 形分布的便携式红外 CO<sub>2</sub> 浓度检测仪(AT-B-CO<sub>2</sub>, 北京安泰吉华科技有限公司)进行实时测定, 调节其浓度波动范围在目标值 5% 以内.

### 1.3 试验设计

田间试验采取裂区设计. 设置 2 个 CO<sub>2</sub> 浓度水平, 分别为 360 μmol·mol<sup>-1</sup>(新疆本底水平, 用 CO<sub>2,360</sub> 表示)、540 μmol·mol<sup>-1</sup>(0.5 倍, 用 CO<sub>2,540</sub> 表示); 每个 CO<sub>2</sub> 浓度下设置 4 个施 N 水平, 分别为 0、150、300 和 450 kg·hm<sup>-2</sup>(分别用 N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 表示). CO<sub>2</sub> 浓度为主处理, N 肥为副处理, 随机排列, 重复 3 次. 副区面积为 42 m<sup>2</sup>(2.8 m×15 m).

试验中氮肥选用尿素(分析纯, AR), 磷、钾肥施用 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(AR), 施肥措施参照当地大田: 氮肥按基施 30%、头水滴施 40%、二水滴施 30% 的比例施用; 磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)用量为 125 kg·hm<sup>-2</sup>, 钾肥(K<sub>2</sub>O)用量为 54 kg·hm<sup>-2</sup>, 全部做基肥, 在播种时与氮肥一次性施入. CO<sub>2</sub> 浓度增加处理设计: 从棉花盛花期(7 月 18 日)开始, 选择新疆棉田光照相对较强时间段(13:00—15:00), 利用滴灌毛管系统注入 CO<sub>2</sub> 气体来实现设定 CO<sub>2</sub> 浓度, 同时随水滴施氮肥, 以实

现碳氮同步滴施. 其他田间管理措施与大田相同.

### 1.4 测定方法

于 8 月 18 日(花铃期)于每小区连续选择生长健康的棉花植株 5 株, 并按地上、地下部分开, 在 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 下烘干 24 h 后称干质量, 粉碎过筛后, 取 10 mg 样品采用标准凯氏定氮法测其全氮含量. 以“之”形随机选择 6 个点, 采用土钻法采集 0~20、20~40 cm 土层土样, 烘干后过 2 mm 筛用于土壤酶活性分析, 采用靛酚比色法测定脲酶活性.

### 1.5 数据处理

采用 SPSS 11.5 进行方差分析, 用 Duncan 法进行差异显著性检验(α=0.05), 分析 CO<sub>2</sub> 浓度和 N 处理组合的主效应及交互作用; 图表中数据均为 3 次重复的平均值±标准偏差. 运用 SigmaPlot 12.5 制图, 构建 CO<sub>2</sub> 浓度与施 N 水平之间的二因素函数关系.

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub> 浓度与氮肥对棉花干物质积累量的影响

不同 CO<sub>2</sub> 浓度下, 4 个 N 肥处理对棉花干物质积累量的影响见表 1. 棉花蕾的干物质积累量受 CO<sub>2</sub> 浓度( $F=28.49^{**}$ )和施 N 量( $F=48.77^{**}$ )的影响极显著, 但不受 C、N 交互作用的影响( $F=1.63$ ). 从 CO<sub>2</sub> 浓度处理对棉花蕾的干物质影响来看, 各施 N 水平下, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加蕾的干物质积累量显著增加, N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 处理下, CO<sub>2,540</sub> 处理蕾的干物质积累量较 CO<sub>2,360</sub> 处理分别高 28.8%、20.7%、11.3% 和 8.5%. 主要原因是大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 植株光合速率增加, 气孔导度降低, 蒸腾作用下降, 从而有利于植物生物量的积累, 但因光合途径的不同, 不同作物提高的幅度有所差异<sup>[25-27]</sup>. 从氮肥的影响来看, 相同的 CO<sub>2</sub> 浓度下, N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理的棉花蕾干物质质量显著高于 N<sub>0</sub> 和 N<sub>450</sub> 处理, 其中, CO<sub>2,540</sub> 浓度下, N<sub>150</sub> 处理棉花蕾的干物质质量较 N<sub>0</sub>、N<sub>450</sub> 处理分别高 40.0%、15.2%, N<sub>300</sub> 处理棉花蕾的干物质质量较 N<sub>0</sub>、N<sub>450</sub> 处理分别高 51.8%、27.7%, 这符合一般的氮肥效应.

棉花茎的干物质质量受 CO<sub>2</sub> 浓度( $F=8.14^{*}$ )和 C、N 交互作用( $F=6.20^{*}$ )的影响显著, 施 N 量对茎的干物质质量影响极显著( $F=34.62^{**}$ ). 除不施 N 处理外, 其余施 N 水平下, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 茎的干物质质量显著增加, 其中, N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 水平下, 与 CO<sub>2,360</sub> 处理相比, CO<sub>2,540</sub> 处理茎的干物质质量增幅分别

为 1.4%、19.1% 和 22.0%。相同的  $\text{CO}_2$  浓度下,  $\text{N}_{300}$  处理茎的干物质量显著高于其他 3 个 N 肥处理,  $\text{CO}_{2\ 360}$  和  $\text{CO}_{2\ 540}$  浓度下,  $\text{N}_{300}$  处理茎的干物质量较  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{450}$  处理分别增加了 64.7%、13.6%、26.6% 和 94.8%、33.5%、23.6%。

$\text{CO}_2$  浓度 ( $F = 36.81^{**}$ ) 和施 N 量 ( $F = 44.02^{**}$ ) 对棉花叶的干物质量影响极显著,  $\text{CO}_2$  和 N 交互作用对叶的干物质量无显著影响。各施 N 水平下,  $\text{CO}_2$  浓度升高, 叶的干物质积累量显著增加,  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$  和  $\text{N}_{450}$  处理下,  $\text{CO}_{2\ 540}$  处理叶的干物质积累量较  $\text{CO}_{2\ 360}$  处理分别提高 13.6%、17.8%、19.0% 和 25.5%。从不同施 N 量对叶的干物质量的影响来看,  $\text{CO}_{2\ 360}$  处理下,  $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$ 、 $\text{N}_{450}$  处理叶的干物质量较  $\text{N}_0$  处理分别高 43.1%、56.8%、27.0%;  $\text{CO}_{2\ 540}$  处理下,  $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$ 、 $\text{N}_{450}$  处理叶的干物质量较  $\text{N}_0$  处理分别高 48.3%、64.3%、40.2%, 其中以  $\text{N}_{300}$  处理下棉花叶的干物质积累量最高。

$\text{CO}_2$  浓度增加下 ( $\text{CO}_{2\ 540}$ ),  $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$  处理的棉花根系干物质量较  $\text{N}_0$  处理略有增加, 但影响不显著。从根系干物质量占总干物质量的比例来看,  $\text{CO}_2$  浓度 ( $F = 3.66$ )、施 N 量 ( $F = 3.97$ ) 以及  $\text{CO}_2$  和 N 交互作用 ( $F = 0.81$ ) 对根的干物质量均无显著影响。

棉花整株干物质积累量受  $\text{CO}_2$  浓度 ( $F = 11.19^{**}$ )、施 N 量 ( $F = 24.15^{**}$ ) 及  $\text{CO}_2$  和 N 交互作用 ( $F = 8.93^{**}$ ) 影响显著。各施 N 水平下, 棉花总干物质量随着  $\text{CO}_2$  浓度增加显著增加,  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$  和  $\text{N}_{450}$  水平下,  $\text{CO}_{2\ 540}$  处理的总干物质量较  $\text{CO}_{2\ 360}$  处理分别高 16.9%、14.8%、15.6% 和 17.4%。相同的  $\text{CO}_2$  浓度下, 从不同 N 肥处理棉花总干物质积累量来看,  $\text{N}_{300}$  处理显著高于其他 3 个 N 肥处理,  $\text{CO}_{2\ 360}$  和  $\text{CO}_{2\ 540}$  浓度下,  $\text{N}_{300}$  处理的棉花总干物质量较  $\text{N}_0$  处理分别增加了 64.8% 和 62.9%。研究表明,  $\text{CO}_2$  浓

度升高对棉花生物量的影响与矿质养分的供给密切相关, 因此, 在考虑高  $\text{CO}_2$  浓度对植物生长促进作用时, 需要考虑养分因子供给的影响<sup>[28-29]</sup>。

## 2.2 $\text{CO}_2$ 浓度与氮肥对棉花氮素吸收量的影响

本试验条件下,  $\text{CO}_2$  浓度升高与 N 肥交互对花铃期棉花蕾和叶的氮素吸收量影响显著, 而对棉花根和茎的氮素吸收量无显著影响, 各器官的氮素吸收量大小为: 蕾铃最高 (1.67~2.11 g), 叶片居中 (1.52~2.03 g), 其次是茎 (0.52~0.74 g), 根中最低 (0.35~0.48 g)。其主要原因是: 棉花蕾铃期, 正是对各种养分需求量最大的时期,  $\text{CO}_2$  浓度升高与 N 肥的有效供应, 可显著促进棉花生长代谢, 表现为地上部生物量的显著增加, 为满足棉花开花结铃的养分需求, 棉花根系将从地下吸收大量的氮素养分, 通过茎将养分运输到棉花蕾铃等生殖器官, 养分表现为在生殖器官中积累 (图 1)。

$\text{CO}_2$  浓度、 $\text{CO}_2$  和 N 交互作用对蕾的氮素吸收量具有显著的促进作用。在  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$  处理下, 与背景  $\text{CO}_2$  浓度处理相比,  $\text{CO}_2$  浓度升高为 540  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  下蕾的氮含量显著增加, 尤其以  $\text{N}_{300}$  处理蕾的氮含量最高, 较  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{450}$  分别提高 7.6%、11.8%、20.7%;  $\text{N}_{450}$  处理下,  $\text{CO}_2$  浓度升高蕾的氮吸收量反而降低。相同的  $\text{CO}_2$  浓度下, 施用氮肥对蕾的氮素吸收量无显著影响。

对基于干物质的棉花叶片含氮量的测定结果显示, 不同  $\text{CO}_2$  浓度处理 ( $F = 0.005$ ) 和施 N 量 ( $F = 1.318$ ) 对叶片氮吸收量影响不显著,  $\text{CO}_2$  和 N 交互作用 ( $F = 3.61^*$ ) 对叶片氮吸收量具有显著影响。在  $\text{N}_0$ 、 $\text{N}_{150}$ 、 $\text{N}_{300}$  处理下,  $\text{CO}_2$  浓度升高, 棉花叶的氮含量表现为增加, 在  $\text{N}_{450}$  处理下表现为下降, 总体上  $\text{CO}_{2\ 540}$  处理叶氮素吸收量高于  $\text{CO}_{2\ 360}$  处理。表明一定程度地增加  $\text{CO}_2$  与 N 肥可促进棉花光合作用与生

表 1  $\text{CO}_2$  浓度升高与不同 N 肥营养下棉花总干物质量

Table 1 Cotton total dry matter under elevated  $\text{CO}_2$  concentration and nitrogen application treatments ( $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ )

| $\text{CO}_2$<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) | N<br>( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | 蕾<br>Bud     | 茎<br>Stem    | 叶<br>Leaf    | 根<br>Root    | 整株<br>Whole plant |
|--|---|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| 360  | 0   | 13.57±2.07e  | 6.64±0.30e   | 10.24±0.56f  | 3.70±0.36d   | 34.15±1.85e       |
|  | 150                                       | 19.83±0.54c  | 9.63±0.21c   | 14.65±1.84cd | 4.84±0.51bc  | 48.95±2.03c       |
|  | 300                                       | 23.85±1.88b  | 10.94±0.66b  | 16.06±1.36b  | 5.43±1.34abc | 56.28±2.12b       |
|  | 450                                       | 19.16±1.11cd | 8.64±0.23d   | 13.00±1.03de | 4.66±1.06cd  | 45.46±1.97c       |
| 540  | 0   | 17.48±1.50d  | 6.69±0.29e   | 11.63±0.85e  | 4.14±0.63cd  | 39.94±0.87d       |
|  | 150                                       | 23.94±1.36b  | 9.76±0.57c   | 17.25±1.71b  | 5.25±0.76abc | 56.20±1.41b       |
|  | 300                                       | 26.54±0.93a  | 13.03±0.81a  | 19.11±1.25a  | 6.38±1.46a   | 65.06±1.65a       |
|  | 450                                       | 20.79±1.45c  | 10.54±0.44bc | 16.31±1.83bc | 5.75±1.97ab  | 53.39±1.35bc      |

同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

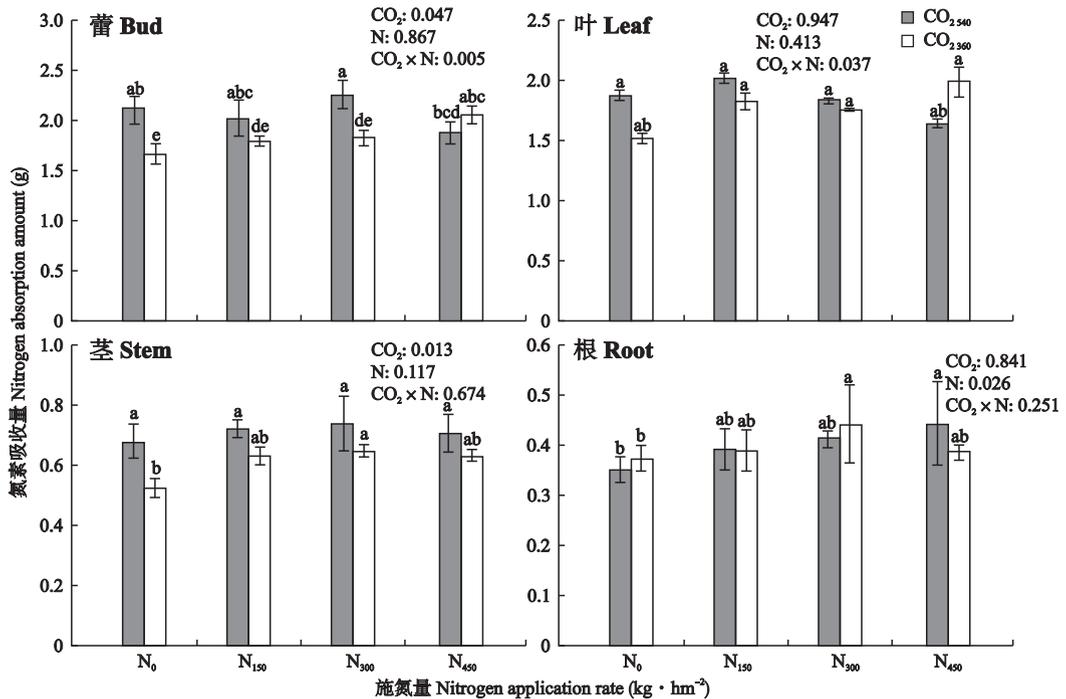


图 1 CO<sub>2</sub> 浓度和施 N 处理对棉花各器官氮素吸收量的影响

Fig.1 Nitrogen absorption of different cotton organs influenced by CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen application.

不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters meant significant difference among treatment at 0.05 level. 图形右上方标注 CO<sub>2</sub>、N、CO<sub>2</sub> × N 的数值表示不同处理内的  $F$  检验值 Upper right labeling values with CO<sub>2</sub>、N and CO<sub>2</sub> × N indicated  $F$  test values of different treatments.

长代谢,从而增加了棉花对氮养分的吸收利用。

从不同 CO<sub>2</sub> 浓度和施 N 量对棉花茎的氮吸收量影响来看,茎秆的氮吸收量受 CO<sub>2</sub> 浓度影响显著 ( $F = 28.54^{**}$ ), 受施 N 量和 CO<sub>2</sub>、N 交互作用的影响未达到显著性水平。4 个施 N 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度升高茎的氮含量均显著增加, N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 水平下, CO<sub>2 540</sub> 处理茎的氮吸收量较 CO<sub>2 360</sub> 处理分别提高了 30.7%、14.3%、13.9% 和 12.7%。各 CO<sub>2</sub> 浓度处理下, 不同施 N 量之间无显著差异, 但总体上, N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理茎的氮含量高于 N<sub>0</sub> 和 N<sub>450</sub> 处理, CO<sub>2 360</sub>、CO<sub>2 540</sub> 浓度下, N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理棉花茎的氮含量较 N<sub>0</sub> 处理分别提高了 21.2%、25.0% 和 5.9%、6.0%。表明合理施用氮肥 (150、300 kg · hm<sup>-2</sup>) 可提高棉花茎的氮素吸收量。

从根系氮含量变化来看, 施 N 量对棉花根的氮吸收量影响显著 ( $F = 12.68^{**}$ ), CO<sub>2</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub>、N 交互作用对根的氮吸收量无显著影响。N<sub>450</sub> 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度增加则根的氮含量增加, 其余施 N 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度增加条件下根的氮含量略有降低, 主要原因是 CO<sub>2</sub> 浓度升高促进了棉花地上部分的生长代谢, 从而增强了其对地下养分的吸收利用, 表现为根系养分向地上其他器官的输送。CO<sub>2</sub> 浓度升高为 540 μmol · mol<sup>-1</sup>, 根的氮吸收量随着施 N 量的增加

显著增加, N<sub>450</sub> 处理较 N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理分别提高 25.7%、12.8% 和 7.3%, 增施氮肥促进了棉花根系的生长和对土壤养分的吸收利用。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 浓度与氮肥对土壤脲酶活性的影响

0~20 cm 土层, CO<sub>2</sub> 浓度处理 ( $F = 105.69^{**}$ ) 对土壤脲酶活性具有极显著影响, CO<sub>2</sub> 和 N 交互作用 ( $F = 6.27^*$ ) 对土壤脲酶活性具有显著影响, 施 N 量 ( $F = 0.69^*$ ) 对土壤脲酶活性影响不显著 (表 2)。各施 N 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度升高土壤脲酶活性显著增加, N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 水平下, CO<sub>2 540</sub> 处理较 CO<sub>2 360</sub> 处理土壤脲酶活性分别提高了 48.4%、30.0%、29.1% 和 25.4%。不同 CO<sub>2</sub> 浓度处理下, 土壤脲酶活性随着施 N 量的增加而增加, 其中, CO<sub>2 540</sub> 处理下, N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>、N<sub>450</sub> 氮素水平较 N<sub>0</sub> 土壤脲酶活性分别提高了 1.1%、9.1%、16.0%; CO<sub>2 360</sub> 处理下, N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>、N<sub>450</sub> 氮素水平较 N<sub>0</sub> 土壤脲酶活性分别提高了 11.9%、25.4%、37.3%。研究表明, CO<sub>2</sub> 浓度增加条件下, 外源 N 肥的有效供应显著促进了棉花生长代谢的同时, 对土壤脲酶合成和分解起到间接的促进作用。本研究结果与苑学霞等<sup>[19]</sup> 和陈利军等<sup>[20]</sup> 的研究结果相一致。

20~40 cm 土层, CO<sub>2</sub> 浓度处理 ( $F = 250.70^{**}$ ) 对土壤脲酶活性具有极显著影响, 施 N 量 ( $F =$

表2 CO<sub>2</sub>浓度升高与N肥处理下土壤脲酶活性Table 2 Soil urease activity under elevated CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen application treatments (mg · g<sup>-1</sup>)

| 土层<br>Soil layer (cm) |                     | N <sub>0</sub> | N <sub>150</sub> | N <sub>300</sub> | N <sub>450</sub> | 平均<br>Mean |
|-----------------------|---------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 0~20                  | CO <sub>2 360</sub> | 1.26±0.39Bc    | 1.41±0.18ABc     | 1.58±0.41Bbc     | 1.73±0.14Bb      | 1.50       |
|                       | CO <sub>2 540</sub> | 1.87±0.20Aab   | 1.89±0.42Aab     | 2.04±0.33Aa      | 2.17±0.16Aa      | 1.99       |
|                       | 平均 Mean             | 1.57           | 1.65             | 1.81             | 1.95             |            |
| 20~40                 | CO <sub>2 360</sub> | 1.21±0.27Bcd   | 1.33±0.24Bc      | 1.40±0.11Bc      | 1.43±0.31ABc     | 1.34       |
|                       | CO <sub>2 540</sub> | 1.79±0.14Aab   | 1.81±0.09Aab     | 1.90±0.12Aa      | 1.89±0.26Aa      | 1.85       |
|                       | 平均 Mean             | 1.50           | 1.57             | 1.65             | 1.66             |            |

同列不同大写字母表示处理间差异极显著( $P<0.01$ ),同行不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different capital letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.01 level, and different small letters in the same row indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

3.03)和C、N交互作用( $F=0.31$ )对土壤脲酶活性无显著影响。4个施N水平下,随着CO<sub>2</sub>浓度升高土壤脲酶活性显著增加,N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>和N<sub>450</sub>水平下,CO<sub>2 540</sub>处理较CO<sub>2 360</sub>处理土壤脲酶活性分别提高了47.9%、36.1%、35.7%和32.2%。2个CO<sub>2</sub>浓度处理下,不同施N量土壤脲酶活性无显著差异,从4个施N水平土壤脲酶活性的平均值来看,高氮处理(N<sub>300</sub>和N<sub>450</sub>)土壤脲酶活性要高于低氮处理(N<sub>0</sub>和N<sub>150</sub>)。

从CO<sub>2</sub>浓度和氮肥处理下土壤脲酶活性的平均值来看,0~20 cm土层土壤脲酶活性显著高于20~40 cm土层,其中,CO<sub>2 360</sub>和CO<sub>2 540</sub>处理下,0~20 cm土层土壤脲酶活性较20~40 cm土层分别高11.9%和7.6%。表明根际土壤脲酶对大气CO<sub>2</sub>浓度升高的响应比非根际更为显著,其主要原因是大气CO<sub>2</sub>浓度升高使植物光合产物增多,导致输入到根部的碳水化合物增多,从而刺激了根系分泌物增加及土壤微生物活性提高<sup>[18,30]</sup>。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 棉花生物量

棉花蕾、叶的干物质积累量受CO<sub>2</sub>浓度和施N量的极显著影响,但不受C、N交互作用的影响。各施N水平下,CO<sub>2</sub>浓度增加使蕾和叶的干物质积累量显著增加,在N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>和N<sub>450</sub>水平下,CO<sub>2 540</sub>处理蕾的干物质积累量较CO<sub>2 360</sub>处理分别提高28.8%、20.7%、11.3%和8.5%,CO<sub>2 540</sub>处理叶的干物质积累量较CO<sub>2 360</sub>处理分别提高13.6%、17.8%、19.0%和25.5%;2个CO<sub>2</sub>浓度下,N<sub>150</sub>和N<sub>300</sub>处理的棉花蕾、叶的干物质显著高于N<sub>0</sub>和N<sub>450</sub>处理。棉花茎的干物质受CO<sub>2</sub>浓度、施N量和C、N交互作用的影响显著,随着CO<sub>2</sub>浓度升高,茎的干物质显著增加,其中,N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>和N<sub>450</sub>水平下,CO<sub>2 540</sub>处理

较CO<sub>2 360</sub>处理茎的干物质质量增幅分别为1.4%、19.1%和22.0%;相同的CO<sub>2</sub>浓度下,N<sub>300</sub>处理茎的干物质质量显著高于其他3个施N肥处理,其中CO<sub>2 540</sub>浓度下,N<sub>300</sub>处理茎的干物质质量较N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>和N<sub>450</sub>处理分别增加了94.8%、33.5%和23.7%。从根系干物质质量占总干物质质量的比例来看,CO<sub>2</sub>浓度、施N量以及C、N交互作用对根的干物质质量均无显著影响,但总体上,在CO<sub>2</sub>浓度增加条件下,N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>处理的棉花根系干物质质量较N<sub>0</sub>处理表现为增加。棉花整株干物质积累量受CO<sub>2</sub>浓度、施N量和C、N交互作用影响显著,各施N水平下,棉花总干物质质量随着CO<sub>2</sub>浓度增加显著增加,在N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>和N<sub>450</sub>水平下,CO<sub>2 540</sub>处理的总干物质质量较CO<sub>2 360</sub>处理分别提高16.9%、14.8%、15.6%和17.4%;2个CO<sub>2</sub>浓度下,N<sub>300</sub>处理棉花总干物质积累量显著高于其他3个N肥处理,CO<sub>2 360</sub>和CO<sub>2 540</sub>浓度下,N<sub>300</sub>处理的棉花总干物质质量较N<sub>0</sub>处理分别增加了64.8%和62.9%。相关研究表明,大气CO<sub>2</sub>浓度升高后,在合理的养分供给下,植物的叶片光合速率增加,气孔导度降低,蒸腾作用下降,因而促进植物生物量显著增加<sup>[24]</sup>。本研究结果显示,大气CO<sub>2</sub>浓度升高为540 μmol · mol<sup>-1</sup>,增施一定氮肥(150~300 kg · hm<sup>-2</sup>),可显著提高棉花叶、蕾、茎和总干物质积累量。

#### 3.2 棉花氮素吸收量

棉花蕾的氮素吸收量受CO<sub>2</sub>浓度和C、N交互作用影响显著,施N肥对蕾的氮素吸收量无显著影响,与背景360 μmol · mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度处理相比,CO<sub>2</sub>浓度升高为540 μmol · mol<sup>-1</sup>,蕾的氮含量显著增加,其中以N<sub>300</sub>处理蕾的氮含量最高,较N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>450</sub>分别提高7.6%、11.8%、20.7%。棉花叶片的氮吸收量受CO<sub>2</sub>浓度处理和施N量的影响不显著,受C、N交互作用的影响显著,在N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub>处理下,CO<sub>2</sub>浓度升高,叶的氮含量表现为增加,在N<sub>450</sub>处理

下表现为下降,表明氮肥施用量过大并不能增加棉株的氮素吸收量.棉花茎的氮素吸收量受 CO<sub>2</sub> 浓度影响显著,受施 N 量和 C、N 交互作用的影响不显著,4 个施 N 水平下,CO<sub>2</sub> 浓度升高茎的氮含量均显著增加;2 个 CO<sub>2</sub> 浓度处理下,不同施 N 量之间无显著差异,但整体上,N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理茎的氮含量高于 N<sub>0</sub> 和 N<sub>450</sub> 处理,CO<sub>2 360</sub>、CO<sub>2 540</sub> 浓度下,N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理棉花茎的氮含量较 N<sub>0</sub> 处理分别提高了 21.2%、25.0% 和 5.9%、6.0%.棉花根系的氮含量受施 N 量的影响显著,CO<sub>2</sub> 浓度和 C、N 交互作用对根的氮吸收量影响不明显,CO<sub>2</sub> 浓度升高为 540 μmol · mol<sup>-1</sup>,根的氮吸收量随着施 N 量的增加显著增加,N<sub>450</sub> 处理较 N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub> 和 N<sub>300</sub> 处理分别提高 25.7%、12.8% 和 7.3%,表明增施氮肥促进了根系的生长及其对土壤养分的吸收利用.

各 CO<sub>2</sub>、N 组合处理下,棉花各器官氮素积累量蕾铃最高,叶片居中,其次是茎秆,根中最低,表现为氮素营养在生殖器官中积累.总体上,CO<sub>2 540</sub> 处理棉花植株氮素吸收量高于 CO<sub>2 360</sub> 处理.究其原因,前人研究认为,CO<sub>2</sub> 浓度升高提高了作物净光合速率,改善了同化 N 素的供能环境,同时相关的 N 代谢过程也发生改变,因此植株氮含量显著增加<sup>[5,31]</sup>;另外,高浓度 CO<sub>2</sub> 处理下,植株 N 代谢过程关键酶的活性受到影响,势必也影响着植株氮含量<sup>[32]</sup>,但具体影响机制尚无定论.

### 3.3 土壤脲酶活性

本试验中,两个土层土壤脲酶活性受 CO<sub>2</sub> 浓度处理影响极显著,CO<sub>2</sub> 浓度升高土壤脲酶活性显著增加,在 N<sub>0</sub>、N<sub>150</sub>、N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub> 水平下,0~20 cm 土层 CO<sub>2 540</sub> 处理较 CO<sub>2 360</sub> 处理土壤脲酶活性分别提高了 48.4%、30.0%、29.1% 和 25.4%,20~40 cm 土层,CO<sub>2 540</sub> 处理较 CO<sub>2 360</sub> 处理土壤脲酶活性分别提高了 47.9%、36.1%、35.7% 和 32.2%.不同的 CO<sub>2</sub> 浓度处理下,0~20 cm 土层土壤脲酶活性随着施 N 量的增加而增加,20~40 cm 土层高氮处理(N<sub>300</sub> 和 N<sub>450</sub>) 下土壤脲酶活性高于低氮处理(N<sub>0</sub> 和 N<sub>150</sub>),表明增加外源氮肥可显著刺激脲酶的活性<sup>[19]</sup>.CO<sub>2</sub> 浓度和 N 肥交互作用下,0~20 cm 土层土壤脲酶活性显著高于 20~40 cm 土层,表明根际土壤脲酶对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应比非根际更为显著.

土壤脲酶是决定土壤中 N 转化的关键酶,主要来源于微生物和植物——包括活体分泌和死亡残体分解释放,人们常用土壤脲酶活性表征土壤的氮素状况.土壤脲酶活性与土壤微生物数量、有机物质含

量及分解速率、可溶性有机碳含量和氮矿化率等因子密切相关<sup>[20,28-29,33]</sup>.相关研究表明,在大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加时,植物生理活性发生变化,进入土壤中的植物凋落物和分泌物数量增加,土壤微生物活性增强,从而增加了由植物和微生物残体分解释放的土壤脲酶数量,引起土壤脲酶活性增加<sup>[2,18,34]</sup>.

植物生长代谢是一个十分复杂的生理生化过程,其影响因素与外界环境因子、养分供给水平及地下土壤生态环境密切相关.CO<sub>2</sub> 浓度升高与 N 素营养增加,具体影响棉花氮代谢的哪个环节及其与土壤脲酶活性之间相关性、交互性如何,还有待于进一步研究.

**致谢** 在试验过程中,新疆农垦科学院尹飞虎研究员给予了悉心指导,课题组成员给予了大力支持、配合与帮助,谨致谢忱!

### 参考文献

- [1] Guo H (郭 晖), Liu X-M (刘秀铭), Guo X-L (郭雪莲), *et al.* A preliminary analysis on the relationship between CO<sub>2</sub> concentrations and global climate change. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2013, **8**(2): 13-19 (in Chinese)
- [2] Kanerva T, Palojarvi A, Ramo K, *et al.* Changes in soil microbial community structure under elevated tropospheric O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**: 2502-2510
- [3] Pan H-L (潘红丽), Zhao X-L (赵秀兰), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect on soil micro-ecosystem from free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Yunnan Environmental Science* (云南环境科学), 2005, **24**(4): 6-9 (in Chinese)
- [4] Peng X-B (彭晓邦), Zhang S-X (张硕新). Research progress in effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on certain physiological process of plants. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2006, **21**(1): 68-71 (in Chinese)
- [5] Zheng F-Y (郑风英), Peng S-L (彭少麟). Meta-analysis of the response of plant ecophysiological variables to doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2001, **43**(11): 1101-1109 (in Chinese)
- [6] Mauney JR, Kimball BA, Pinter JPJ, *et al.* Growth and yield of cotton in response to a free air carbon dioxide enrichment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **70**: 49-67
- [7] Bai L-P (白莉萍), Zhou G-S (周广胜). Responses and adaptations of wheat to elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rise. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2004, **12**(4): 23-26 (in Chinese)
- [8] Yang J-L (杨江龙). The relationship between atmospheric CO<sub>2</sub> and plant nitrogen nutrition. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), 2002, **11**(2): 163-166 (in Chinese)
- [9] Stitt M, Krapp A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: The physiological

- and molecular background. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**: 583–621
- [10] Tingey DT, Phillips DL, Johnson MG, *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> and N-fertilization on fine root growth and mortality of *Pinus ponderosa*. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, **37**: 3–83
- [11] Zhang W-F (张旺锋), Wang Z-L (王振林), Yu S-L (余松烈), *et al.* Effect of nitrogen on canopy photosynthesis and yield formation in high-yielding cotton of Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2002, **28** (6): 789–796 (in Chinese)
- [12] Hu M-F (胡明芳), Tian C-Y (田长彦), Lü S-Z (吕昭智), *et al.* Effects of N rate on cotton yield and nitrate-concentration in plant tissue and soil. *Journal of Northwest A & F University* (西北农林科技大学学报), 2006, **34**(4): 63–68 (in Chinese)
- [13] Xu Z-H (许振柱). Responses and Adaptation of Typical Plants to Climate Change and CO<sub>2</sub> Concentration Enrichment. Postdoctoral Research Report. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2003 (in Chinese)
- [14] Men Z-H (门中华), Li S-X (李生秀). Effect of CO<sub>2</sub> concentration on nitrogen metabolism of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38** (2): 320–326 (in Chinese)
- [15] Xu Y-B (许育彬). Effect of CO<sub>2</sub> Enrichment on Plant Growth and Nitrogen Use of Winter Wheat. PhD Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2012 (in Chinese)
- [16] Ma H-L (马红亮), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the allocation of biomass and C, N uptake in rice organs. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2005, **13**(3): 38–41 (in Chinese)
- [17] Pang J (庞静), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> on nutrient uptake by rice and nutrient contents in rice grain. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2005, **19**(4): 350–354 (in Chinese)
- [18] Xin L-H (辛丽花), Han S-J (韩士杰), Zheng J-Q (郑俊强), *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> on soil microorganism and enzyme: A review. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(6): 1231–1235 (in Chinese)
- [19] Yuan X-X (苑学霞), Lin X-G (林先贵), Chu H-Y (褚海燕), *et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on soil enzyme activities at different nitrogen level. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(1): 48–53 (in Chinese)
- [20] Chen L-J (陈利军), Wu Z-J (武志杰), Huang G-H (黄国宏), *et al.* Effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on soil urease and phosphatase activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(10): 1356–1357 (in Chinese)
- [21] Barnard R, Barthes L, Roux XL, *et al.* Atmospheric CO<sub>2</sub> elevation has little effect on nitrifying and denitrifying enzyme activity in four European grasslands. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1–10
- [22] Johnson DW, Cheng W, Ball JT. Effects of CO<sub>2</sub> and N fertilization on decomposition and immobilization in ponderosa pine litter. *Plant and Soil*, 2000, **224**: 115–122
- [23] Kimball BA, Morris CF, Pinter Jr PJ. Elevated CO<sub>2</sub>, drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality. *New Phytologist*, 2001, **150**: 295–303
- [24] Dong G-C (董桂春), Wang Y-L (王余龙), Yang H-J (杨洪建), *et al.* Effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on nitrogen accumulation and utilization efficiency in rice. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(10): 1219–1222 (in Chinese)
- [25] Morgan JA, Legain DR, Mosler AR, *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses of the Colorado short grass steppe. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 451–466
- [26] Yang LX, Wang YL, Dong GC, *et al.* The impact of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply on grain quality of rice. *Field Crops Research*, 2007, **102**: 128–140
- [27] Du Q-R (杜启燃), Liu J-F (刘建锋), Wang P-C (王鹏程), *et al.* Eco-physiological response of *Quercus variabilis* seedlings to increased atmospheric CO<sub>2</sub> and N supply. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(1): 24–30 (in Chinese)
- [28] Zhao T-H (赵天宏), Wang M-Y (王美玉), Zhang W-W (张巍巍), *et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on plant photosynthesis. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(5): 1096–1100 (in Chinese)
- [29] Sun R-L (孙瑞莲), Zhu L-S (朱鲁生), Zhao B-Q (赵秉强), *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(10): 1907–1910 (in Chinese)
- [30] Zhang Y-L (张玉兰), Zhang L-L (张丽莉), Chen L-J (陈利军), *et al.* Response of soil hydrolase and oxidoreductase activities to free air carbon dioxide enrichment (FACE) under rice-wheat rotation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15** (6): 1014–1018 (in Chinese)
- [31] Moorhead DL, Linkins AE. Elevated CO<sub>2</sub> alters below-ground exoenzyme activities in tussock tundra. *Plant and Soil*, 1997, **189**: 321–329
- [32] Wu X-C (吴秀臣), Sun H (孙辉), Yang W-Q (杨万勤). Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide on activity of soil enzymes. *Soils* (土壤), 2007, **39**(3): 358–363 (in Chinese)
- [33] Kimball BA, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crops to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Advances in Agronomy*, 2002, **77**: 293–368
- [34] Wang L (王亮), Zhu J-G (朱建国), Zhu C-W (朱春梧), *et al.* Relationship between decrease in nitrogen content and activities of key enzymes related to nitrogen metabolism in rice leaves under elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2008, **22**(5): 499–506 (in Chinese)

作者简介 吕宁,女,1985年生,硕士,助理研究员.主要从事作物生理生态、植物营养施肥研究. E-mail: lvning20030118@163.com

责任编辑 肖红