

大气 CO₂ 浓度升高与氮肥营养对滴灌棉田 “棉花 - 土壤”系统氮分布的影响

吕 宁¹, 尹飞虎¹, 高志建², 刘 瑜², 谢宗铭³

(1. 新疆农垦科学院, 新疆 石河子 832000; 2. 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;
3. 新疆农垦科学院分子农业技术育种中心, 新疆 石河子 832000)

摘 要: 通过半开顶式 CO₂ 人工气候室, 研究了 CO₂ 浓度升高 (360、540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 720 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 与不同氮肥营养 (0、150、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 相互作用对蕾铃期棉花 - 土壤氮含量变化及棉花氮素吸收的影响, 结果显示: 大气 CO₂ 浓度增加, 高氮肥处理下棉花叶片、蕾铃中氮含量显著降低, 茎秆、根系中氮含量增加, 棉花整株氮含量表现为下降; 相同的 CO₂ 浓度下, 随着氮素营养的增加棉花各器官氮积累量呈增加趋势, 其中蕾铃、叶片氮积累量较高, 茎秆、根系氮积累量相对较少, 说明 CO₂ 浓度增加与增施氮肥促进了土壤氮素向植株叶片和生殖器官运输。通过对土壤无机氮含量的测定分析, CO₂ 浓度升高为 540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 各施氮水平下棉田土壤 NO₃⁻-N 含量显著降低, NH₄⁺-N 含量在低氮水平下有少量增加, 在高氮水平下表现为降低; CO₂ 浓度升高为 720 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 土壤 NO₃⁻-N 含量表现为降低, NH₄⁺-N 含量呈增加趋势。研究表明: 大气 CO₂ 浓度增加且浓度范围在 500 ~ 720 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 增加氮肥施用量可有效促进棉花对氮素养分尤其是 NO₃⁻-N 的吸收利用。

关键词: CO₂ 浓度升高; 氮肥营养; 滴灌棉田; “棉花 - 土壤”系统; 氮分布

中图分类号: S143.1; S162.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)06-0092-08

Effects of elevated atmospheric CO₂ and nitrogen fertilization on nitrogen distribution of “cotton - soil” in cotton field under drip irrigation

LU Ning¹, YIN Fei-hu¹, GAO Zhi-jian², LIU Yu², XIE Zong-ming³

(1. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Institute of Field Water Conservancy, Soil and Fertilizer Research, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. Center for Molecular Agrobiotechnology and Breeding, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Semi-open-top artificial climate chamber is designed to study the effects of elevated CO₂ concentration (360, 540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ and 720 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) and different nitrogen fertilizer application (0, 150, 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) on nitrogen distribution of bud stage “cotton - soil” system. The results showed that, when CO₂ concentration elevated to 540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, the total N content of cotton leaves and buds decreased significantly under high nitrogen levels (300, 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), but the total N content of cotton stems and roots increased slightly at different nitrogen levels, the whole cotton N content decreased and the decline proportion of elevated CO₂ (540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) treatment was greater than the elevated CO₂ (720 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$). Under the same CO₂ concentration, the total N content of cotton plant had an increasing tendency accompanied by increase of nitrogen application rate, and nitrogen accumulation in cotton buds and leaves was more than that in cotton stems and roots. This showed that elevated CO₂ concentration interacted with nitrogen fertilizer application to promote underground nitrogen nutrients transporting to cotton leaves and buds. The determination of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N of cotton field found that the effects was significant with elevated CO₂ concentration on soil nitrogen content ($P < 0.05$). Compared with the ambient CO₂, when CO₂ concentration elevated to 540 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, cotton field soil NO₃⁻-N content decreased significantly at different nitrogen levels, but soil NH₄⁺-N con-

收稿日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40973061); 公益性行业农业科研专项 (20120312); “十一五”国家“863”重大专项 (006AA100218); 新疆兵团重大科技攻关项目 (GKB00NKYJ12NY)

作者简介: 吕 宁 (1985—), 助理研究员, 硕士, 研究方向为作物营养与施肥。E-mail: lvning20030118@163.com。

通信作者: 尹飞虎, 研究员, 博士生导师, 长期从事植物营养、水盐运移等研究。E-mail: nkyfth@sohu.com。

tent increased slightly under low nitrogen levels (0, 150 kg·hm⁻²) and decreased under high nitrogen levels (300, 450 kg·hm⁻²); when CO₂ concentration elevated to 720 μmol·mol⁻¹, the soil NO₃⁻-N content still decreased but the decline proportion was lower than elevated CO₂ (540 μmol·mol⁻¹), and soil NH₄⁺-N content tended to increase. This study concluded that when CO₂ concentration elevated to 500 ~ 700 μmol·mol⁻¹, increasing nitrogen fertilizer application level (300 kg·hm⁻²) on cotton field could significantly promote cotton absorbing N especially NO₃⁻-N nutrient.

Keywords: elevated CO₂; nitrogen fertilizer application; cotton field with drip irrigation; “cotton - soil” system; N distribution

大气中 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度的快速增长, 导致全球气候变暖。预计到 21 世纪末, 大气 CO₂ 浓度将接近或达到 700 μmol·mol⁻¹ 以上^[1]。CO₂ 是植物光合作用的重要原料, 大气中 CO₂ 浓度倍增, 不仅影响着全球气候变化, 也深刻影响着农业生态环境。研究表明, 大气中 CO₂ 浓度升高, 植物光合能力和生物量显著增加^[2], 促进了植物对氮素的吸收和代谢^[2-4]。Pitelka^[5] 等研究发现 CO₂ 浓度升高有利于植物组织中碳水化合物的积累, 因而降低了植株含氮量; 也有研究表明^[6-7], 棉花、小麦、玉米和水稻等作物在高浓度 CO₂ 下, 体内 C/N 值均有不同程度的升高, 即植株含 N 率下降, 但 CO₂ 浓度倍增降低了豆科植物根中的含氮量, 进而增加植株地上部分的含氮量, 可能是由于豆科植物具有根瘤菌, 能够从空气中固定 N 素, 以补充植物在高 CO₂ 浓度下快速生长对 N 素的要求。许振柱等^[8] 研究指出, CO₂ 倍增使柠条和羊柴叶片含氮量分别降低了 10.40% 和 5.06%。但不同物种生态系统中, CO₂ 浓度升高后植物氮养分在不同部位的分布及吸收利用状况, 还与植物本身的光合途径、外源 N 素营养的供给、土壤本身的养分状态及被吸收氮的形态有很大关系^[9]。

氮作为植物蛋白质和叶绿素的重要组成部分, 氮素供给对植物的光合作用、呼吸作用及其它一些酶代谢有着直接和间接的影响, 从而影响植物体内 N 素吸收利用与土壤养分的分配状况。因此, CO₂ 浓度增加后, 外源氮素营养对植物生长代谢起到补偿作用^[10-12]。Joel G 等^[13] 研究指出, 氮素的短缺限制了 CO₂ 的促进作用; 研究还发现^[14], 雀麦光合作用对 CO₂ 浓度升高的响应会因氮素不足而受到限制, 在低氮条件下, 高 CO₂ 浓度处理的光合速率低于正常 CO₂ 浓度。而在不同供氮形态营养条件下, 特别是在水分胁迫条件下, 水稻在叶片含氮量、光合特性及光合同化物的分配方面均存在较大的差异^[15]。Stitt M 等^[16] 研究表明, 在高 CO₂ 浓度条件下, C₃ 植物的光合适应现象主要发生在低氮条件下, 高氮条件下则不发生。郭世伟等^[17] 进一步研究指出提高氮素源的有效性和同步供应能力能够防止适应现象

的发生。

目前, 国内外对大气 CO₂ 浓度增高与施氮处理下不同生态系统碳 - 氮的响应与适应的研究日趋增多, 但对于占有中国最大播种面积, 而且区域气候和环境特征明显的新疆棉田生态系统氮变化与植物生长的响应研究则鲜见报道。本项目基于高密度覆膜栽培体系的新疆棉田生态系统水、肥依赖性大, 棉田 CO₂ 水平低、强光照、现有光能利用率低等特点, 设置半开顶式人工气候室, 以滴灌管网通 CO₂ 气体和施 N 肥为试验处理, 通过测定棉田植株各器官全 N 与土壤表层 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的含量分布, 揭示植物 - 土壤对 CO₂、氮素变化及其交互作用的响应机制, 从而确定棉田冠层 CO₂ 浓度升高条件下的最佳施氮水平, 以期指导未来 CO₂ 浓度升高环境下棉田氮肥的优化施用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

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 1 946 mm, 年均气温 7.5℃ ~ 8.2℃, 年日照时数 2 526 ~ 2 874 h, 生长季日照时数为 1 900 ~ 2 000 h, 年无霜期 160 d 左右, ≥10℃ 的活动积温为 3 570℃ ~ 3 729℃。供试土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验材料

供试作物为棉花 (*Gossypium hirsutum*), 品种为新陆早 33 号; 供试肥料: 尿素 CO(NH₂)₂, 实测含 N 量为 46%; 供试 CO₂ 气体 (钢瓶装, 石河子天港乙炔厂生产)。

1.3 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 CO₂ 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。CO₂ 气体输入通过 CO₂ 减压流量阀控制, 内部浓度通过呈 S 型分布的便携式红外 CO₂ 浓度检测仪 (AT-B-CO₂, 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。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and Chemical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	质地 Soil texture	土层/cm Soil layer	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(g·kg ⁻¹)	pH 值 pH value
灰漠土 Gray desert soil	中壤 Medium loam	0~20	6.94	41	21	99	8.3
		20~40	5.73	33	14	103	

1.4 试验设计

试验采取裂区设计。设置 3 个 CO₂ 浓度水平, 分别为 360 μmol·mol⁻¹ (CK, 新疆本底水平)、540 μmol·mol⁻¹ (0.5 倍) 和 720 μmol·mol⁻¹ (1 倍); 每个 CO₂ 浓度下设置 4 个施 N 水平, 分别为 0、150、300 kg·hm⁻² 和 450 kg·hm⁻² (根据前期研究及当地施肥水平, 新疆北部棉区中等水肥条件需施纯氮 300 kg·hm⁻² [18-19], 以确定本试验施 N 浓度梯度)。CO₂ 浓度为主处理, N 肥为副处理, 共 12 个处理, 各重复 3 次, 共计 36 个小区, 小区面积 (副区面积) 42 m² (2.8 m × 15 m)。主区与主区间设隔离带, 副区间相邻。

试验中氮肥 (N) 选用尿素 (分析纯, AR), 磷、钾肥施用 KH₂PO₄ (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 (P₂O₅) 用量为 125 kg·hm⁻², 钾肥 (K₂O) 用量为 54 kg·hm⁻², 全部做基肥, 在播种时与氮肥一次性施入。全生育期滴水 9 次, 施肥 7 次。CO₂ 浓度增加处理, 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 CO₂ 气体来实现设定 CO₂ 浓度, 同时随水滴施氮肥, 以实现碳氮同步滴施。其它田间管理措施与大田相同。

1.5 测试指标与分析方法

本研究于 8 月 18 日 (通 CO₂ 气体 30 d 后), 于每个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℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干 24 h 后称干重, 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 个点利用土钻法采集 0~20、20~40 cm 土层土样, 取 10 g 鲜土样, 加入 1 mol·L⁻¹ KCl 50 mL 浸提液, 振荡 30 min 后用滤纸过滤, 用连续流动分析仪 (Continuous Flow Analytical System, CFA) 测定溶液中硝态氮和铵态氮浓度。土壤水分采用烘干法测定。

采用 SPSS 11.0 进行方差统计分析与显著性检验, 运用 SIGMAPLOT 12.5、Excel 2003 构建 CO₂ 浓度与施 N 水平之间的函数关系, 来分析植株全氮、土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量的梯度变化。

2 结果分析

2.1 CO₂ 浓度倍增与不同 N 素营养对棉花生物量的影响

测定结果显示 (见表 2), CO₂ 浓度倍增与 N 素营养互作下, 棉花各器官干物质增加显著 ($P < 0.05$)。在各施 N 水平下, CO₂ 浓度升高棉花干物质积累量均明显增加, 与背景 CO₂ 浓度相比, CO₂ 540 处理下, 棉花根、茎、叶、蕾及整株干物质重平均增幅分别为 11.97%、16.18%、10.46% 和 9.33%; CO₂ 720 处理下, 棉花根、茎、叶、蕾及整株干物质重平均增幅分别为 9.24%、5.92%、2.31% 和 4.44%, 表明 CO₂ 浓度升高为 540 μmol·mol⁻¹ 时, 对棉花生长和干物质积累促进作用更为显著。这与张富仓等 [20] 研究结果相一致。

相同 CO₂ 浓度下, 随着施氮水平的增加, 棉花干物质积累量依次增加, 且高氮水平下增幅较为显著。CO₂ 540 条件下, N₃₀₀、N₄₅₀ 处理较 N₀ 棉花总干物质增幅为 36.83%、41.14%; CO₂ 720 条件下, N₃₀₀、N₄₅₀ 水平较 N₀ 棉花总干物质增幅为 40.26%、34.21%。花铃期棉花各器官干物质分配状况为: 蕾铃最高, 叶片其次, 茎秆、根系较低, 表现为养分向生殖器官的运输。

2.2 CO₂ 浓度倍增与不同 N 素营养对棉花植株全氮含量的影响

2.2.1 叶片氮含量变化 对基于干物质的棉花叶片含氮量的测定结果显示 (图 1A), 不同 CO₂ 浓度处理对叶片氮含量的影响显著 ($P < 0.05$), 在低氮处理下, CO₂ 浓度升高使叶片中的含氮量略有增加; 而在高氮处理下, CO₂ 浓度升高使叶片中的含氮量显著降低, 表明 CO₂ 浓度倍增促进了叶片中氮的吸收, 且增施 N 肥补偿了 CO₂ 的浓度效应; 同时 CO₂ 浓度升高后促进了棉花光合作用, 叶片中的碳水化合物增加, 氮含量也会降低 [20]。其中, N₃₀₀ 水平下 CO₂ 540、CO₂ 720 较对照分别降低了 17.39%、7.10%, N₄₅₀ 水平下 CO₂ 540、CO₂ 720 较对照分别降低了 21.34%、12.32%, 相同的施 N 水平下 CO₂ 540 处理叶片含氮量降低幅度大于 CO₂ 720 处理。每个 CO₂ 浓度

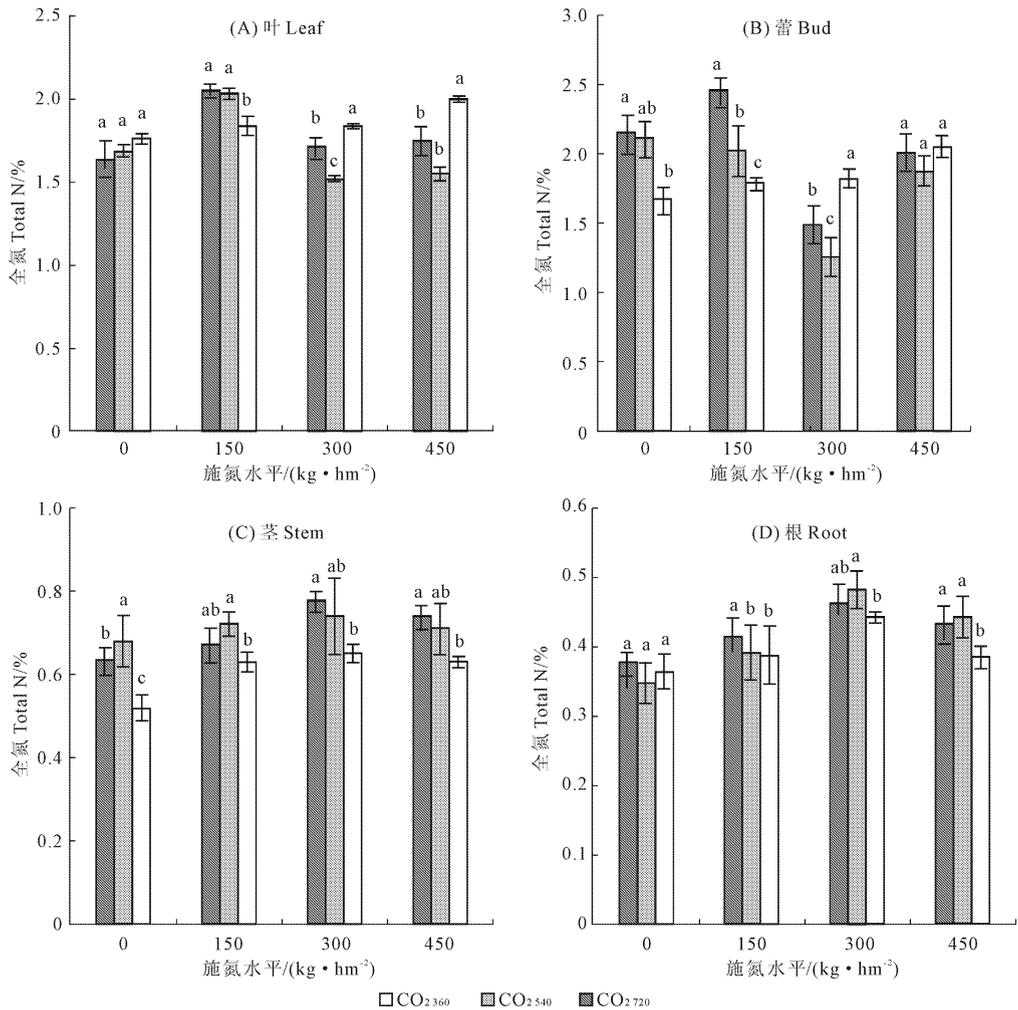
处理下,增加氮素营养有使棉花叶片含氮量增加的趋势,且低氮处理下的增加效应更为显著 ($P < 0.05$),CO₂ 540 浓度下,N₁₅₀较 N₀ 处理叶片中 N 含量

增幅为 16.95%,CO₂ 720 浓度下,N₁₅₀较 N₀ 处理叶片中 N 含量增幅为 20.35%。施氮肥可延迟成熟叶片的衰老,提高植物对逆境的适应性。

表 2 CO₂ 浓度倍增与不同 N 素营养条件下棉花花铃期干物质积累及其分配状况/g

Table 5 Cotton drymatter amount and distribution response to atmospheric CO₂ doubling and nitrogen supply

施氮水平 N level /(mg·kg ⁻¹)	叶 Leaf			茎 Stem			蕾 Bud			根 Root			总和 Total		
	CO ₂ 360	CO ₂ 540	CO ₂ 720	CO ₂ 360	CO ₂ 540	CO ₂ 720	CO ₂ 360	CO ₂ 540	CO ₂ 720	CO ₂ 360	CO ₂ 540	CO ₂ 720	CO ₂ 360	CO ₂ 540	CO ₂ 720
0	11.64	12.23	12.12	7.21	11.49	9.16	16.77	13.88	14.84	4.10	3.94	3.88	39.73b	41.54a	39.99b
150	13.60	16.91	12.75	8.24	9.96	9.96	17.76	23.59	16.97	4.84	6.38	5.29	44.44b	46.81a	44.97b
300	16.45	16.25	16.60	10.23	9.96	11.29	20.23	15.34	22.89	5.43	5.25	5.32	52.34b	56.84a	56.09a
450	15.26	17.51	16.80	10.14	10.23	7.54	19.85	25.14	23.04	4.66	5.75	6.30	49.91b	58.63a	53.67ab
平均 Average	14.24	15.73	14.57	8.96	10.41	9.49	18.65	19.49	19.44	4.76	5.33	5.20	46.61bc	50.96a	48.68b



注:柱形图上的小写字母表示 CO₂ 处理间差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The small letters indicate significant difference ($P < 0.05$) among different CO₂ treatments. The same as below.

图 1 CO₂ 浓度升高与不同氮肥处理对棉花叶(A)、蕾(B)、茎(C)、根氮含量(D)的影响

Fig.1 Effects of elevated CO₂ and nitrogen supply on nitrogen of leaf(A), bud(B), stem(C) and root(D)/%

2.2.2 蕾铃氮含量变化(如图 1B) 相同的施 N 水平下,不同 CO₂ 浓度处理之间,棉花蕾铃氮含量差异显著 ($P < 0.05$)。低氮处理下,随着 CO₂ 浓度升高

蕾中氮含量表现为增加,而高氮处理下 CO₂ 浓度升高蕾铃氮含量反而降低,在 N₃₀₀、N₄₅₀ 水平下,CO₂ 540 处理较对照蕾铃氮含量分别降低了 30.71%、

8.69%, CO_2 720 处理蕾中氮含量分别降低了 18.06%、1.96%, 与对照 CO_2 浓度比较, CO_2 540 处理降低幅度更为显著。 CO_2 540 - N_{300} 组合较其它处理蕾的氮含量最低。相同的 CO_2 浓度下, 各施 N 水平之间蕾铃氮含量差异并不明显, 且变化趋势无显著规律性, 具体表现为: 背景 CO_2 浓度下, 随着氮素营养的增加蕾铃氮含量依次增加; CO_2 浓度增加处理下, 相对于不施氮处理, N_{150} 蕾铃氮含量增加, N_{300} 、 N_{450} 蕾铃氮含量降低, N_{300} 降低比例较大。总体上, 各 C - N 组合处理下, 蕾铃氮含量的变化趋势与叶片相一致。

2.2.3 茎秆氮含量变化(图 1C) 本研究结果显示, 高氮水平下, 随着 CO_2 浓度升高, 茎秆氮含量依次呈线性增加 ($P < 0.05$)。同一 CO_2 浓度下, 施 N 肥对棉花茎秆氮含量有影响但不显著, 总体上随着 N 素营养的增加茎部氮含量呈增加趋势。

2.2.4 根系氮含量变化(图 1D) 相同施 N 水平下, CO_2 浓度升高根部氮含量增加, 在高氮水平下, 这种增加效果更为显著 ($P < 0.05$), 与对照 CO_2 浓度相比, N_{300} 水平的 CO_2 540、 CO_2 720 分别增加了 9.16%、5.20%, 这可能由于 CO_2 浓度升高促进了棉花根系的生长及其土壤微生物活性, 从而增加了根系对土壤氮养分的吸收利用^[7,21]; CO_2 540 处理的增加幅度大于 CO_2 720 处理, 说明 CO_2 浓度过高, 棉株对养分的吸收反而会降低, 这与棉花光饱和点密切相关。每个 CO_2 浓度下, 随着 N 素营养的增加, 根系氮含量依次呈增加趋势。

在本试验条件下, 不同 CO_2 、N 处理组合对棉花生长中后期的植株氮素吸收有显著影响 ($P < 0.05$), 各器官表现为: 蕾铃的氮含量最高(为 1.2 ~ 2.5%), 叶片氮含量居中(1.5% ~ 2.0%), 其次是茎秆(0.5% ~ 0.8%), 根中氮含量最低(0.5% ~ 0.8%); 不同器官受到的影响程度不同, 其中蕾铃、叶片受到影响较大, 而茎秆、根系受到的影响较小, 主要原因是 CO_2 浓度升高与氮肥的有效供应, 促进了棉花光合和生长代谢, 表现为地上部分生物量增加, 地上棉株需要通过根系从地下吸收一定的氮素养分, 通过茎部将养分运输到棉花蕾、铃等营养器官, 以供棉花开花结铃的营养所需^[18,22-23]。根据各器官干重算出棉花整株氮积累量, 不同 CO_2 浓度与 N 肥处理对棉花整株氮素积累量的影响见表 3。随着 CO_2 浓度的升高, 棉花整株的氮含量显著降低 ($P < 0.05$), 且增施氮肥植株氮降低趋势更为明显, 表明 CO_2 浓度增加与高氮肥施用可促进棉花对氮素养分的吸收; 而相同 CO_2 浓度下, 不同氮素之间棉花植

株氮积累的差异不大。

表 3 不同处理棉花整株的氮素积累
Table 3 Nitrogen accumulation of the whole cotton under different processing/%

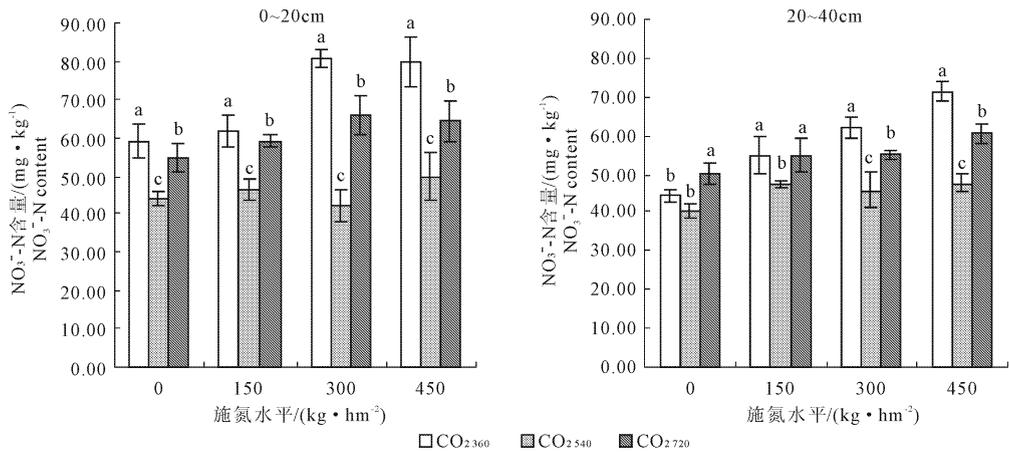
处理 Treatment	N_0	N_{150}	N_{300}	N_{450}	平均 Average
CO_2 360	4.31	4.65	4.76	5.07	4.70a
CO_2 540	5.03	4.17	4.04	4.28	4.38c
CO_2 720	4.80	4.60	4.37	4.56	4.58b
平均 Average	4.71a	4.47b	4.39b	4.64a	

2.3 CO_2 浓度升高与不同氮素营养对棉田土壤 NO_3^- -N 含量的影响

如图 2 所示, 相同的施 N 水平下 CO_2 浓度增加, 土壤 NO_3^- -N 含量显著降低 ($F = 8.448$, $P < 0.05$)。与对照 CO_2 浓度处理相比, 在 N_0 水平 CO_2 540、 CO_2 720 处理土壤 NO_3^- -N 分别降低了 25.90%、6.94%, 在 N_{150} 水平分别降低了 25.05%、4.52%, 在 N_{300} 水平分别降低了 47.77%、18.31%, 在 N_{450} 水平分别降低了 37.38%、19.30%; 高氮水平下, CO_2 浓度增加使土壤 NO_3^- -N 含量下降更为明显, 主要原因是 CO_2 浓度升高与高施 N 肥处理, 可显著促进棉花生长代谢水平^[20,24], 从而增加棉花对土壤中 NO_3^- -N 的吸收, 而低氮水平下会减弱 CO_2 浓度对棉花生物量的响应, 因此对土壤养分变化影响也会减弱; 另外, 覆膜滴灌条件形成的厌氧环境会使土壤硝化微生物活性受到抑制, 也会降低土壤 NO_3^- -N 含量; CO_2 540 处理土壤 NO_3^- -N 的降低幅度大于 CO_2 720 处理, 说明 CO_2 浓度过高, 超过了棉花光适浓度反而会抑制棉花对土壤养分的吸收。有研究表明, 持续的高 CO_2 浓度环境下, 植物对土壤养分的吸收率会降低 21% ~ 29%^[25-26]。

相同的 CO_2 浓度处理下, 4 个施 N 肥水平之间土壤 NO_3^- -N 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。在 CO_2 540、 CO_2 720 处理下, 随着施 N 水平的增加土壤 NO_3^- -N 含量依次增加, 在 CO_2 540 处理下, 除 N_{300} 土壤 NO_3^- -N 含量较不施氮降低 4.00% 外, 其余施 N 水平 NO_3^- -N 含量较 N_0 是增加的。总体来讲, CO_2 540 - N_{300} 处理下 NO_3^- -N 含量降低大于其它 C、N 组合。

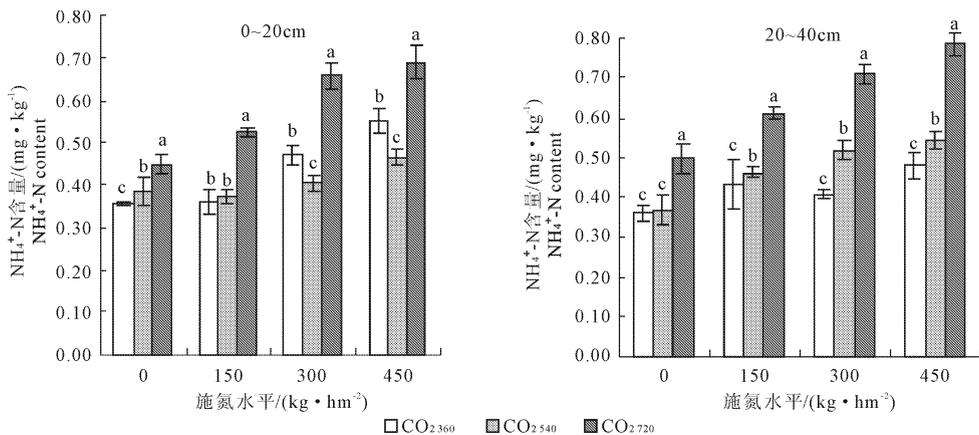
随着土壤深度增加, 土壤 NO_3^- -N 含量呈降低趋势。20 ~ 40 cm 土层土壤 NO_3^- -N 含量变化趋势与 0 ~ 20 cm 土层相同, 但 CO_2 浓度增加与施氮肥相互作用, 0 ~ 20 cm 土层土壤 NO_3^- -N 含量变化更为显著。

图 2 CO₂ 浓度升高与不同施氮处理对棉田土壤 NO₃⁻-N 含量影响Fig.2 Influence of elevated CO₂ and nitrogen supply on NO₃⁻-N of cotton field soil

2.4 CO₂ 浓度升高与不同 N 素营养对滴灌棉田土壤 NH₄⁺-N 含量的影响

本研究显示(见图 3),相同的 N 肥水平下,不同 CO₂ 浓度处理之间土壤 NH₄⁺-N 含量差异极显著($F = 176.7, P < 0.01$)。相对于对照 CO₂ 浓度处理,CO₂ 540 处理在 N₀、N₁₅₀ 水平下土壤 NH₄⁺-N 含量略有增加,而在 N₃₀₀、N₄₅₀ 水平下却是降低的,降低比例分别为 16.40%、17.94%,说明 CO₂ 浓度增加为 540 μmol·mol⁻¹,并与高氮肥处理相互作用时可促进棉

花的生长代谢,有利于棉花对土壤 NH₄⁺-N 的吸收,这与植株氮含量变化趋势相符合;CO₂ 720 处理在各施 N 水平土壤 NH₄⁺-N 含量均是增加的,且低氮处理增加比例更为明显,这与前人在闽楠、水稻等其它植物上的研究结果相一致^[27-28]。林先贵等^[29]研究指出,稻麦轮作农田生态系统中,CO₂ 浓度增加后,土壤氨氧化细菌表现为数量减少、优势菌株硝化活性降低,土壤 NH₄⁺-N 质量分数表现为增高。总体来讲,CO₂ 540 - N₃₀₀ 土壤 NH₄⁺-N 含量低于其它 C、N 组合处理。

图 3 CO₂ 浓度升高与不同施氮处理对棉田土壤 NH₄⁺-N 含量影响Fig.3 Influence of elevated CO₂ and nitrogen supply on NH₄⁺-N of cotton field soil

相同的 CO₂ 浓度处理下,土壤 NH₄⁺-N 含量随着施 N 水平增加而增加,且高氮与低氮处理之间差异显著($P < 0.05$),CO₂ 540 条件下,N₃₀₀、N₄₅₀ 较 N₀ 处理土壤 NH₄⁺-N 含量增幅为 4.45%、17.16%,CO₂ 720 条件下,N₁₅₀、N₃₀₀、N₄₅₀ 较 N₀ 处理土壤 NH₄⁺-N 含增幅比例为 14.43%、31.57%、34.80%。

相较 0 ~ 20 cm 土层,20 ~ 40 cm 土层土壤

NH₄⁺-N 含量是增加的,但不显著($P > 0.05$)。每个施氮水平下,随着 CO₂ 浓度增加,土壤 NH₄⁺-N 含量依次增加。

3 结论与讨论

1) 研究表明,CO₂ 浓度倍增与 N 素营养互作下,棉花各器官干物质增加显著($P < 0.05$)。在各

施 N 水平下, CO_2 浓度升高棉花干物质积累量均明显增加, 其中, CO_2 浓度升高为 $540 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时, 对棉花生长和干物质积累促进作用更为显著。相同 CO_2 浓度下, 随着施 N 水平的增加, 棉花干物质积累量依次增加。花铃期棉花各器官干物质分配状况为: 蕾铃最高, 叶片其次, 茎秆、根系较低, 表现为养分向生殖器官的运输。

2) 研究结果显示, CO_2 浓度增加与施 N 肥处理相互作用对棉花整株氮养分的影响是显著的 ($P < 0.05$)。大气 CO_2 浓度升高后, 在增施氮肥条件下棉株叶片、蕾铃中的氮含量显著降低, 且 CO_2_{540} 处理的降低幅度大于 CO_2_{720} 处理, 而棉株茎秆、根系中的氮含量随着 CO_2 浓度的增加表现为线性增加。相同的 CO_2 浓度下, 随着 N 素营养的增加棉花各器官氮积累量呈增加趋势, 蕾铃的氮含量最高 (1.2% ~ 2.5%), 叶片氮含量居中 (1.5% ~ 2.0%), 其次是茎秆 (0.5% ~ 0.8%), 根中氮含量最低 (0.5% ~ 0.8%)。试验表明一定的 CO_2 浓度处理与较高的 N 肥施用促进棉花对氮素养分的吸收。

3) 大气 CO_2 浓度升高为 $540 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时, 各施 N 水平下棉田土壤 NO_3^- -N 含量显著降低, 土壤 NH_4^+ -N 含量在低氮水平下有少量增加, 在 N_{300} 和 N_{450} 水平下表现为降低; 大气 CO_2 浓度升高为 $720 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 土壤 NO_3^- -N 含量表现为降低, NH_4^+ -N 含量呈增加趋势。表明大气 CO_2 浓度增加, 且高氮肥供给处理下棉田土壤 N 素养分尤其 NO_3^- -N 下降更为显著。每个 CO_2 浓度下, 随着 N 素营养的增加土壤 NH_4^+ -N 呈增加趋势, 土壤 NO_3^- -N 含量变化不大。总的来说, 大气 CO_2 浓度升高, 棉田土壤中有效 N 素养分是降低的, 且 CO_2_{540} - N_{300} 处理土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量显著低于其它 C、N 组合。土壤养分含量的降低很大程度取决于作物的吸收, 大气 CO_2 浓度升高, 促进了棉花光合作用和生长代谢, 也就增加了棉株对地下土壤的养分的吸收利用。而土壤中不同氮含量的变化, 一方面与南、北方土壤无机氮存在形态有关, 即北方农田土壤主要以 NO_3^- -N 的形态存在, 从棉花生长的适应性角度表现出对 NO_3^- -N 的选择性吸收^[22,30]; 另一方面, 覆膜滴灌的厌氧环境及 CO_2 浓度升高引起的高温 and 干旱等环境的改变, 必然影响着农田土壤的硝化微生物的活性, 也会降低土壤 NO_3^- -N 含量^[31]。

总体来讲, 大气 CO_2 浓度升高, 棉田“棉株 - 土壤”体系中氮素养分是降低的, CO_2_{540} 处理下高氮肥施用使得这种降低趋势更为明显, 表明一定的 CO_2

浓度与 N 肥施用相互作用促进了棉花生长代谢及其对氮素的吸收利用。通过对不同 CO_2 浓度处理与 N 肥施用“棉花 - 土壤”氮素含量变化及棉花氮素吸收规律的相关性分析得出, CO_2 浓度升高且浓度范围在 $500 \sim 720 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 增加氮肥施用量有利于棉花对土壤 N 素养分尤其是 NO_3^- -N 的吸收利用。因此, 建议在未来大气 CO_2 浓度升高情景下, 增加棉田土壤氮肥施用量, 以补偿棉花对高 CO_2 浓度的响应。但本研究仅是 1 a 的观测结果, 试验时间相对短暂, 有一定的局限性和不足, 而 CO_2 浓度变化与作物生态系统中养分变化是一个十分复杂的生理生态过程, CO_2 浓度与氮肥之间的交互规律还需进一步验证, CO_2 浓度升高对“棉花 - 土壤系统”中不同形态氮转化及养分残留与利用的影响机制还有待深入研究。

致谢: 在本文试验过程和论文撰写中, 感谢尹飞虎研究员的悉心指导, 感谢新疆农垦科学院农田水利研究所领导的大力支持, 感谢课题组成员的配合与帮助, 使得本试验顺利完成。在此, 一并深表谢意!

参考文献:

- [1] 郭 晖, 刘秀铭, 郭雪莲, 等. 大气 CO_2 浓度变化与全球气候变化关系初步探讨[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(2): 13-19.
- [2] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] Fernandez R J, Reynolds J F. Potential growth and drought tolerance of eight desert grasses: lack of a trade-off [J]. *Oecologia*, 2000, 123: 90-98.
- [4] 许振柱, 周广胜. 陆生植物对全球变化的适应性研究进展[J]. 自然科学进展, 2003, 13(2): 113-119.
- [5] Pitelka L F. Ecosystem response to elevated CO_2 [J]. *Trends Ecol Evol*, 1994, (9): 204-207.
- [6] Kimball B A, Morris C F, Pinter Jr P J. Elevated CO_2 drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality [J]. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 295-303.
- [7] 董桂春, 王余龙, 杨洪建, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高对水稻 N 素吸收利用的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1219-1222.
- [8] 许振柱, 周广胜, 肖春旺, 等. CO_2 浓度倍增条件下土壤干旱对两种沙生灌木碳氮含量及其适应性的影响 [J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2186-2191.
- [9] Grunzweig J M, Körner C. Growth, water and nitrogen relation in grass model ecosystems of the semi-arid Negev of Israel exposed to CO_2 [J]. *Oecologia*, 2001, 128: 251-262.
- [10] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 等. 氮肥对新疆高产棉花群体光合性能和产量形成的影响 [J]. 作物学报, 2002, 28(6): 789-796.
- [11] 杨江龙. 大气 CO_2 与植物氮素营养的关系 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 163-166.

- [12] Johnson D W, Cheng W, Ball J T. Effects of CO₂ and N fertilization on decomposition and immobilization in ponderosa pine litter[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224:115-122.
- [13] Joel G, Chanpin III S, Chinariello N R, et al. Species-specific responses of plant communities to altered carbon and nutrient availability[J]. *Global Change Biol*, 2001, (7):435-450.
- [14] Larigauderie A, Hilbert D W, Oechel W C. Effect of CO₂ enrichment and nitrogen availability on resource acquisition and resource allocation in a grass, *Bromus mollis*[J]. *Oecologia*, 1988, 77:554-560.
- [15] 周毅,郭世伟,宋娜,等.水分胁迫和供氮形态耦合作用下分蘖期水稻的光合、水分与氮素利用[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(3):313-318.
- [16] Stitt M, Krapp A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background[J]. *Plant Cell and Environment*, 1999, 22(6):553-621.
- [17] 郭世伟,冉炜,周毅,等.试论大气CO₂浓度升高条件下水稻碳氮代谢变化及其调控途径[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(5):560-566.
- [18] 尹飞虎,高志建,谢宗铭,等.不同碳氮施肥组合对新疆滴灌棉田冠层CO₂浓度、光合作用和产量的影响[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(4):724-728.
- [19] 尹飞虎,刘洪亮,谢宗铭,等.棉花滴灌专用肥氮磷钾元素在土壤中的运移及其利用率[J]. *地理研究*, 2010, 29(2):235-243.
- [20] 张富仓,康绍忠,马清林,等.大气CO₂浓度升高对棉花生理特性和生长的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1999, 7(3):268-272.
- [21] 王小治,张海进,孙伟,等.大气CO₂浓度升高对稻田土壤氮素的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8):2161-2165.
- [22] 胡明芳,田长彦,吕昭智,等.氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报*, 2006, 34(4):63-67.
- [23] 马红亮,吴艳红,朱建国,等.大气CO₂浓度升高对作物根际土壤氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4):849-854.
- [24] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等.植物地上部分对大气CO₂浓度升高的响应[J]. *生态环境*, 2004, 13(3):390-393.
- [25] Roser Matamala, Bert G Drake. The influence of atmospheric CO₂ enrichment on plant-soil nitrogen interactions in a wetland plant community on the Chesapeake Bay[J]. *Plant and Soil*, 1999, 210:93-101.
- [26] Mauney J R, Kimball B A, Pinter P J, et al. Growth and yield of cotton in response to a free-air carbon dioxide enrichment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 70:49-67.
- [27] 韩文军,廖飞勇,何平.大气CO₂浓度倍增对闽楠光合性状的影响[J]. *中南林业学院学报*, 2003, 23(2):62-65.
- [28] Gen Yunchen, Zhen Huayong, Yi Liao, et al. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and Ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2005, 47(7):1036-1044.
- [29] 林先贵,胡君利,褚海燕,等.土壤氨氧化细菌对大气CO₂浓度增高的响应[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(1):44-46.
- [30] 刘晓星.干旱区土壤氮转化过程及其影响因素研究[D].乌鲁木齐:新疆大学, 2012.
- [31] 陈利军,武志杰,黄国宏,等.大气CO₂增加对土壤脲酶、磷酸酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10):1356-1357.

(上接第37页)

- [4] 钱卫鹏,邹志荣,孟长军.大棚内膜下根系分区交替滴灌不同灌溉下限对甜瓜生长及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3):138-141.
- [5] 齐广平,张恩和.膜下滴灌条件下不同灌溉量对番茄根系分布和产量的影响[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(3):463-467.
- [6] 王宣.小管出流条件下树莓适宜灌溉制度研究[J]. *农业科技与装备*, 2012, 211(1):46-48.
- [7] 杨再强,谢以萍,张旭东,等.水分胁迫对枇杷果实发育阶段的光合特性和果实品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(6):89-92.
- [8] 惠竹梅,房玉林,郭玉枝,等.水分胁迫对葡萄幼苗4种主要生理指标的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3):146-149.
- [9] Zegbe J A, Behboudian M H, Clothier B E. Response of tomato to partial rootzone drying and deficit irrigation[J]. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 2007, 30(2):125-131.
- [10] 刘世秋,张振文,惠竹梅,等.干旱胁迫对酿酒葡萄赤霞珠光合特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(5):170-172.
- [11] 张芮,成自勇,李有先.水分亏缺对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2):125-128.
- [12] 韩占江,于振文,王东,等.调亏灌溉对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11):2671-2677.
- [13] 张芮,成自勇,李毅,等.小管出流亏缺灌溉对设施延后栽培葡萄产量与品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20):108-113.
- [14] 崔宁,张玉龙,刘洋,等.节点渗灌灌水控制上限对番茄生长及产量和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2010, (7):7-8.
- [15] 冯玉龙,刘恩举,孙国斌.根系温度对植物的影响(I).根温对植物生长及光合作用的影响[J]. *东北林业大学学报*, 1995, 23(3):63-69.
- [16] 任志雨,王秀峰,魏珉.不同根区温度对黄瓜幼苗矿质元素含量及根系吸收功能的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 34(3):351-355.
- [17] 裴红宾,张永清,上官铁梁.根区温度胁迫对小麦抗氧化酶活性及根苗生长的影响[J]. *山西师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 20(6):78-81.