

大气 CO₂ 浓度升高对水稻土团聚体的分布与有机碳含量的影响^①

徐 乔^{1,2}, 朱建国^{1*}, 朱春梧¹, 刘 钢¹, 曾 青¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采取中国 FACE (Free-air CO₂ enrichment) 平台 9 年试验区的土壤, 采用干湿筛法获得水稳定性团聚体, 研究高 CO₂ 浓度处理对水稻土团聚体组成、有机碳含量的影响。FACE 试验设对照和高 CO₂ 浓度两个主处理, 低氮和常氮两个施氮水平裂区。结果表明, 经高 CO₂ 浓度连续 9 年处理后, 小区土壤有机碳总量显著增加 (年均 1%)。高 CO₂ 浓度改变 0~5 cm 土层土壤团聚体的分布, 大团聚体 (>250 μm) 含量有减少趋势, 而微团聚体 (250~53 μm) 含量平均增加 27.49% ($P = 0.05$); 常氮仅改变 5~15 cm 土层土壤粗大团聚体 (>2 000 μm) 含量, 平均减少 20.60% ($P < 0.05$)。分析表明, 高 CO₂ 浓度使得 0~5 cm 土层土壤细大团聚体 (2 000~250 μm) 有机碳含量平均降低 9.67% ($P < 0.01$), 微团聚体有机碳含量平均增加 31.30% ($P < 0.05$), CO₂ 和 N 交互有促进上述变化趋势。高 CO₂ 浓度增加 5~15 cm 土层土壤粗大团聚体有机碳含量 (26.44%, $P = 0.05$), 降低细大团聚体有机碳含量 (6.83%, $P < 0.01$); 常氮减少 5~15 cm 土层土壤粗大团聚体有机碳含量 (30.19%, $P < 0.001$); CO₂ 和 N 交互显著降低 5~15 cm 土层两级大团聚体有机碳含量。高 CO₂ 浓度降低耕层土壤 (0~15 cm) 细大团聚体有机碳储量 (6.41%, $P < 0.01$), 增加微团聚体有机碳储量 (15.09%, $P < 0.05$); 常氮显著降低两级大团聚体有机碳储量, 且 CO₂ 和 N 交互降低细大团聚体有机碳储量 ($P < 0.05$)。

关键词: 高 CO₂ 浓度; 团聚体分级; 有机碳; 水稻土

中图分类号: S152.3

化石燃料的燃烧和土地利用方式的变更导致越来越多的温室气体释放到大气中。大气 CO₂ 浓度已由工业革命前的 278 μmol/mol 升高到 2008 年的 385 μmol/mol^[1]。高 CO₂ 浓度下植被光合作用增强, 植被生长增加, 从而向土壤输入的有机物质增多^[2-4], 这对土壤碳库增加有利。该过程还受土壤氮素调控, 氮素缺乏条件下高 CO₂ 浓度的增产效应受到限制^[5], 增施氮肥可以满足高 CO₂ 浓度下植物对氮素的大量需求^[6]。但高 CO₂ 浓度下土壤中植物来源的底物增多, 促进微生物生长, 增加土壤呼吸, 限制了陆地生态系统的固碳潜力^[7-8]。因而“高 CO₂ 浓度通过增加陆地生态系统碳吸收缓解大气 CO₂ 升高的压力”这一观点受到质疑。

大量研究表明高 CO₂ 浓度下土壤有机碳增加不明显^[5, 9-10], 原因可能是研究周期短和/或研究方法不够敏感。土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳贮存库, 其总量约 1 750 Pg, 约为大气碳库的 2 倍, 生物碳库的 3 倍^[11]。鉴于其库容巨大, 检测土壤有机碳的变化有赖于选择更为敏感的指标。土壤团聚体作为土壤

结构的基本单元, 是土壤有机碳的主要结合场所^[12]。团聚体有机碳对外界环境变化较为敏感, 其含量、动态可以有效地表征环境对土壤有机碳的影响^[13]。土壤有机碳受气候变化、土地利用方式、人类生产活动等因素的调控^[14-16]。相对于森林和草原生态系统, 人类活动对农田生态系统的影响较大。近年来, 针对气候变化条件下森林和草原生态系统土壤团聚体有机碳的研究较多^[17-19], 然而对高 CO₂ 浓度下农田土壤尤其是稻田土壤团聚体有机碳的研究比较缺乏。

本文主要研究中长期高 CO₂ 浓度对稻田土壤有机碳总量、土壤水稳定性团聚组成以及团聚体有机碳含量的影响, 以期合理估算未来高 CO₂ 浓度气候条件下土壤碳库储量, 增加土壤有机碳的有效储量提供合理化建议与科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 CO₂-FACE 平台

中国水稻 FACE (Free-air CO₂ enrichment) 系统平

基金项目: 科技部国际合作和交流项目(2010DFA22770)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(31261140364)和国家自然科学基金项目(41271310)资助。

* 通讯作者(jgzhu@issas.ac.cn)

作者简介: 徐乔(1989—), 男, 江苏宿迁人, 主要从事全球变化下土壤有机碳循环与转化研究。E-mail: qxu@issas.ac.cn

台建于江苏省江都市小纪镇 (32°35'5"N, 119°42'0"E), 于 2004 年的水稻生长季开始运行。研究区年降雨量约 1 000 mm, 年均气温约 15℃, 年均日照时间约 2 132 h, 年无霜期大于 220 天。土壤类型为发育于下位砂浆土的水耕人为土。系统包括 3 个 FACE 圈 (F) 和 3 个对照圈 (A) 对照圈大气 CO₂ 浓度约为 370 μmol/mol, FACE 圈 CO₂ 浓度比对照圈 CO₂ 浓度高 200 μmol/mol。FACE 圈和对照圈间的距离在 70 m 以上以消除圈和圈之间的干扰。试验采用裂区设计, CO₂ 浓度作为主处理, 在每个 FACE 或者对照圈内设置低氮 (LN, 125 kg/hm²) 和常氮 (NN, 250 kg/hm²) 两个施氮水平裂区。因此, 试验分为 ALN、ANN、FLN、FNN 4 个处理, 每个处理重复 3 次。FACE 系统的具体设计方法、原理及运行方式等参考文献[20]。

1.2 样品采集及团聚体筛分

为获得田间原状土壤样品, 于 2012 年水稻收获前夕进行采样。在 ALN、ANN、FLN、FNN 4 个处理下, 分两层 (0~5 cm, 5~15 cm) 采集环刀样和混合样品 (6 点混合)。将混合样品装于硬质塑料盒带回实验室, 挑去有机残体及其他侵入体, 过 8 mm 土筛, 自然风干后混匀, 用于土壤理化性质的测定和土壤团聚体分级。

土壤团聚体分级采用干湿筛法^[21], 并略作修改。主要步骤如下: 首先对风干土样进行干筛处理, 分别通过孔径为 2 000、250、53 μm 的土筛, 将留在各级筛子上的机械稳定性团聚体分别称重, 计算各级机械稳定性团聚体的含量。按照干筛比例配比一份土样用于湿筛, 每份土为 60 g。先在 (25±1)℃ 水中浸泡

5 min, 然后将土样依次通过 2 000、250、53 μm 的土筛, 得到粗大团聚体 (>2 000 μm)、细大团聚体 (2 000~250 μm)、微团聚体 (250~53 μm) 和黏砂砾 (<53 μm)。残留在筛上的水稳定性团聚体用蒸馏水小心地转移到铝盒中, 在 60℃ 烘干、称重。

1.3 测定项目及方法

采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法对筛分前的原土以及各级湿筛团聚体进行有机碳分析。土壤体积质量的测定采用环刀法; 全氮采用半微量凯氏定氮法测定; 全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定; 全钾采用火焰光度法测定。团聚体的水稳性用水稳定性团聚体的平均重量直径表示, 其计算方法为每一级水稳性团聚体的含量 (各级团聚体在样品总重量中所占的比例) 乘以该粒级的平均直径, 然后将其相加。

1.4 统计分析

数据采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据整理和统计分析, 用 Duncan 法进行差异显著性比较, 采用 Origin 8.5 进行作图。

2 结果与分析

2.1 FACE 条件下稻田土壤理化性质的变化

与对照相比, 大气 CO₂ 浓度连续升高 9 年后, 稻田土壤团聚体平均重量直径平均减少 5.73%, 说明高 CO₂ 浓度下, 稻田土壤大团聚体数量趋于减少 (表 1)。高 CO₂ 浓度处理 9 年后, 稻田土壤 (0~15 cm) 有机碳总量显著增加, 在两个氮水平下平均增加 1.43 g/kg, 年均增幅约 1%。与低氮相比, 常规施氮显著降低了土

表 1 中长期高 CO₂ 浓度对稻田土壤性质的影响
Table 1 Effects of long-term elevated CO₂ on characteristics of rice soils

CO ₂	N	深度 (cm)	体积质量 (g/cm ³)	平均重量直径 (mm)	有机碳 (g/kg)	碳氮比 C/N	全氮 (g/kg)
A	LN	0 ~ 5	1.06 ± 0.01	1.51 ± 0.19	15.78 ± 0.84	10.37 ± 0.45	1.53 ± 0.15
		5 ~ 15	1.19 ± 0.02	1.85 ± 0.13	13.12 ± 0.57	12.32 ± 2.05	1.13 ± 0.20
F	LN	0 ~ 5	1.08 ± 0.02	1.23 ± 0.18	17.74 ± 0.30	11.44 ± 0.69	1.60 ± 0.09
		5 ~ 15	1.25 ± 0.02	1.82 ± 0.03	14.34 ± 0.83	11.70 ± 1.13	1.35 ± 0.04
A	NN	0 ~ 5	1.06 ± 0.02	1.28 ± 0.06	15.19 ± 0.43	9.64 ± 0.78	1.51 ± 0.18
		5 ~ 15	1.17 ± 0.03	1.55 ± 0.18	13.39 ± 0.39	9.94 ± 0.20	1.28 ± 0.02
F	NN	0 ~ 5	1.02 ± 0.02	1.15 ± 0.09	16.51 ± 0.70	11.47 ± 2.4	1.60 ± 0.40
		5 ~ 15	1.18 ± 0.02	1.63 ± 0.05	14.59 ± 1.05	9.30 ± 0.76	1.57 ± 0.02
Δ (%)			1.26	-5.73	8.68	2.75	7.41
P	CO ₂		ns	ns	0.01	ns	ns
	N		0.03	0.04	ns	ns	ns
	深度		<0.01	<0.01	<0.01	ns	ns
	CO ₂ ×N		ns	ns	ns	ns	ns

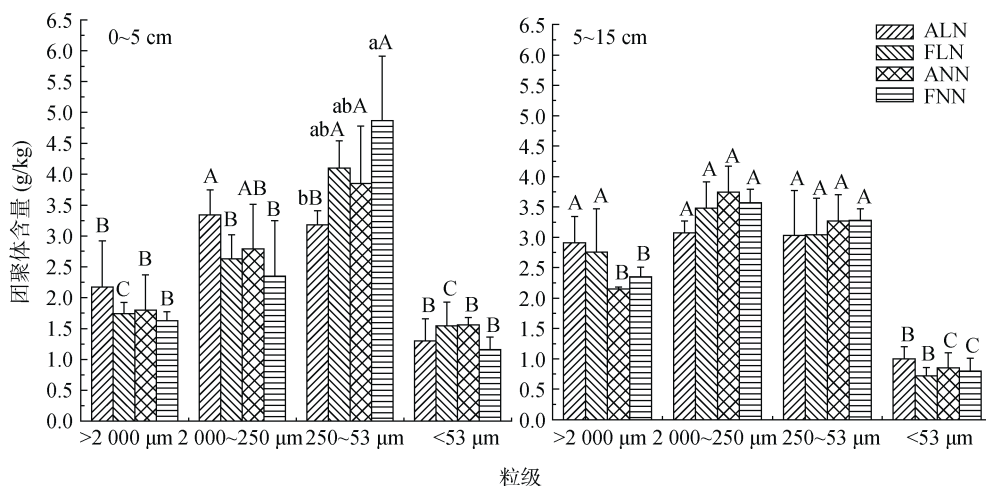
注: Δ=(F-A)/A×100%; ns 表示没有显著影响, 下表同。

壤体质量 ($P<0.05$) 和团聚体平均重量直径 ($P<0.05$); 施氮水平对土壤碳、氮总量没有影响。土壤体质量和平均重量直径随土壤深度的增加而增加, 土壤有机碳含量随深度增加而降低。

2.2 FACE 条件下稻田土壤团聚体的分布

大气 CO₂ 浓度连续升高 9 年后稻田土壤的团聚体组成发生了改变(图 1)。0~5 cm 土层, 微团聚体

含量最高, 细大团聚体次之, 两者之和达 0~5 cm 土层土壤总重的 65.25%~72.18%; 粗大团聚体含量为 1.63~2.17 g/kg, 黏砂砾含量最低, 仅为 1.16~1.56 g/kg。5~15 cm 土层, 细大团聚体、微团聚体含量接近, 两者之和占 5~15 cm 土层土壤总重的 60.90%~70.06%; 粗大团聚体含量 (2.15~2.91 g/kg) 次之; 黏砂砾含量最低, 约为 0.72~1.00 g/kg。



(图中小写字母不同表示同一粒级不同处理间差异显著 ($P<0.05$, 在 CO₂ 和 N 存在交互作用后所进行的多重比较), 大写字母不同表示同一处理不同粒级间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

图 1 不同处理下土壤团聚体组成

Fig. 1 Composition of aggregates under different treatments

FACE 试验 9 年后, 稻田土壤团聚体的分布发生了一些变化。与对照相比, 高 CO₂ 浓度下 0~5 cm 土层土壤粗大团聚体和细大团聚体含量在两个氮水平下平均减少 14.99% 和 18.55%, 而微团聚体含量平均增加 27.49% ($P=0.05$); 不同氮水平间差异不显著, 但是常氮水平有抑制这种变化的趋势。高 CO₂ 浓度对 5~15 cm 土层土壤团聚体分布的影响不大; 但与低氮相比, 常氮水平下粗大团聚体含量平均减少 20.60% ($P<0.05$)。

2.3 FACE 条件下稻田土壤团聚体有机碳浓度的变化

两层土壤团聚体有机碳浓度变化规律相同, 均表现为随粒径的减小而降低 (粗大团聚体除外, 图 2)。0~5 cm 土层各处理下不同粒级团聚体间有机碳浓度间的差异均达显著水平 (大气 CO₂ 浓度处理下的粗大团聚体和微团聚体有机碳浓度除外); 5~15 cm 土层, 各处理下细大团聚体有机碳浓度与黏砂砾有机碳浓度间的差异也达显著性水平。

与对照相比, 高 CO₂ 浓度处理下 0~5 cm 土层土壤粗大团聚体有机碳浓度在两个氮水平下平均增加 12.62%, 细大团聚体有机碳浓度平均增加 11.29% ($P<0.01$); 常氮水平下 0~5 cm 土层土壤细大团聚体

有机碳浓度平均增加 11.15% ($P<0.01$), 且 CO₂ 和 N 交互显著增加 0~5 cm 土层土壤细大团聚体有机碳浓度 ($P<0.01$)。高 CO₂ 浓度处理降低 5~15 cm 土层土壤细大团聚体有机碳浓度, 两个氮水平下平均降低 10.06% ($P<0.001$), 而黏砂砾有机碳浓度平均增加 23.25% ($P<0.05$); 常氮水平显著降低细大团聚体有机碳浓度, 平均降低 11.47% ($P<0.001$), 且 CO₂ 和 N 交互显著降低 5~15 cm 土层土壤细大团聚体有机碳浓度 ($P<0.001$)。

2.4 FACE 条件下稻田土壤团聚体有机碳含量的变化

某一粒级团聚体有机碳浓度乘以该粒级团聚体的质量分数可以得到这一粒级团聚体的有机碳含量 (图 3)。由图可知, 0~5 cm 土层土壤有机碳主要分布在细大团聚体和微团聚体中, 两者之和为 10.66~12.37 g/kg, 达全土有机碳总量的 65.37%~76.72%; 5~15 cm 土层, 土壤有机碳含量以细大团聚体最高 (5.04~5.55 g/kg), 粗大团聚体和微团聚体居中 (2.32~3.87 g/kg), 黏砂砾最低 (0.63~0.73 g/kg)。

不同处理对各粒级团聚体有机碳含量有一定的影响: 与对照相比, 高 CO₂ 浓度处理显著降低 0~5 cm 土层土壤细大团聚体有机碳含量, 在两个氮水平下平

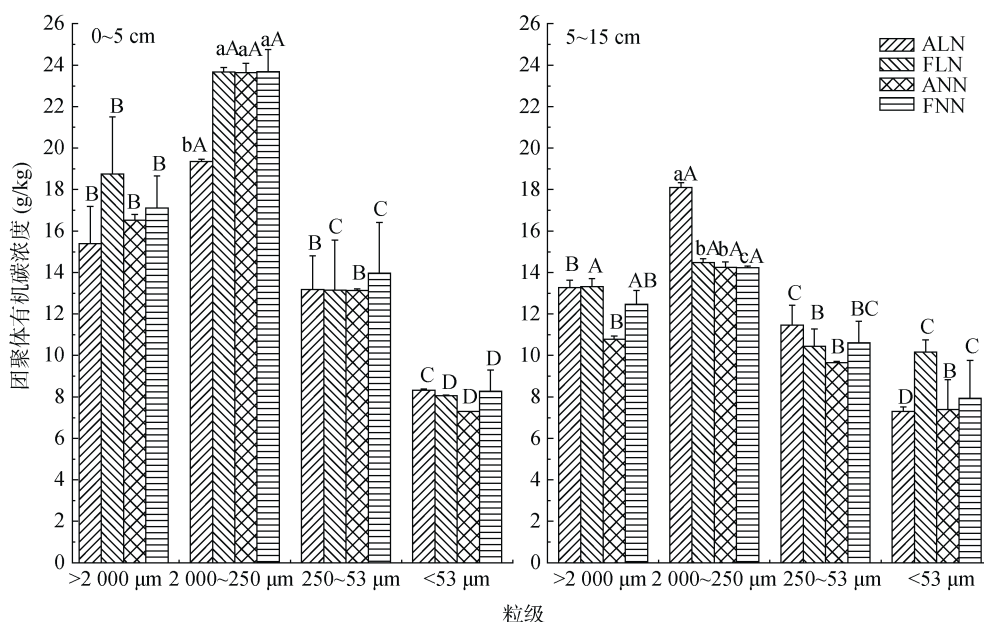


图 2 不同处理下土壤团聚体有机碳浓度

Fig. 2 Concentrations of SOC in aggregates under different treatments

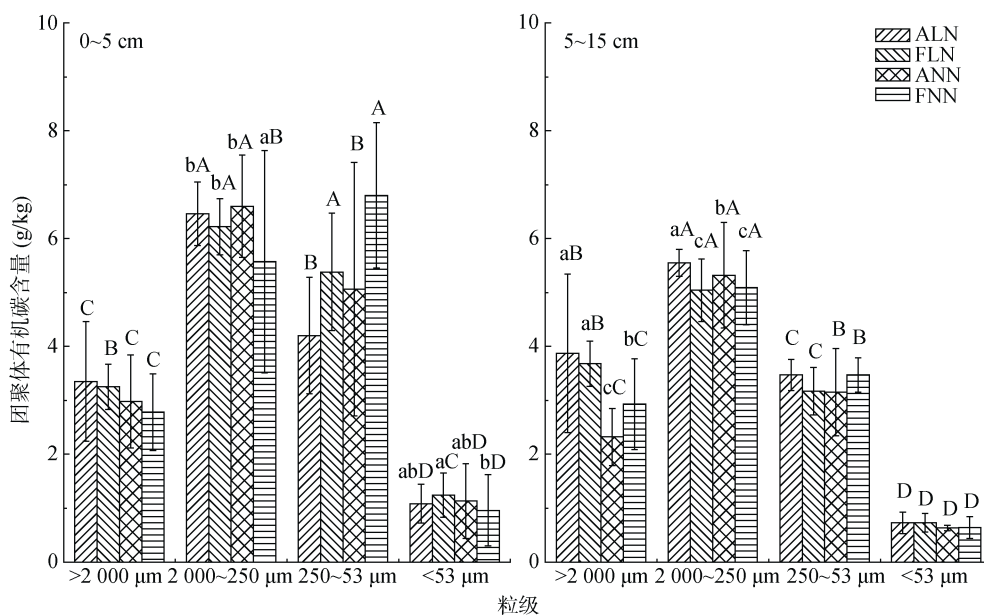


图 3 不同处理下土壤团聚体有机碳含量

Fig. 3 Contents of SOC in aggregates under different treatments

均降低 9.67% ($P<0.01$), 显著增加微团聚体有机碳含量, 平均增加 31.30% ($P<0.05$)。不同氮水平间差异不显著, 但 CO_2 和 N 交互有促进上述变化的趋势。5~15 cm 土层, 高 CO_2 浓度显著增加常氮下土壤粗大团聚体有机碳含量, 平均增加 26.44% ($P=0.05$), 显著降低细大团聚体有机碳含量, 两个氮水平下平均减少 6.8% ($P<0.01$); 常氮水平下 5~15 cm 土层土壤粗大团聚体有机碳含量平均减少 30.19% ($P<0.001$); CO_2 和 N 交互显著降低 5~15 cm 土层两级大团聚体有机碳含量。

2.5 FACE 条件下稻田土壤及团聚体有机碳储量的变化

根据 0~5 cm 和 5~15 cm 土层土壤团聚体的有机碳含量和两层土壤的体积质量可以计算出不同处理下耕层土壤 (0~15 cm) 各级团聚体的有机碳储量 (表 2)。由表可知, 细大团聚体有机碳储量最高 (8.78~10.02 t/hm²), 粗大团聚体和微团聚体有机碳储量次之 (4.29~7.57 t/hm²), 黏砂砾有机碳储量最低, 仅为 1.24~1.52 t/hm²。

与对照相比, 高 CO_2 浓度处理下细大团聚体有

表 2 中长期高 CO₂ 浓度对耕层土壤 (0 ~ 15 cm) 团聚体有机碳储量的影响
Table 2 Effects of long-term elevated CO₂ on storage of organic carbon at 0 – 15 cm soil depth

CO ₂	N	>2 000 μm	2 000 ~ 250 μm	250 ~ 53 μm	<53 μm
A	LN	6.26 ± 0.24	10.02 ± 0.07	6.35 ± 0.31	1.43 ± 0.04
F	LN	6.25 ± 0.17	9.69 ± 0.08	6.89 ± 0.05	1.52 ± 0.10
A	NN	4.29 ± 0.12	9.71 ± 0.14	6.21 ± 1.29	1.30 ± 0.29
F	NN	4.86 ± 0.01	8.78 ± 0.06	7.57 ± 0.83	1.24 ± 0.23
Δ (%)		5.36	-6.41	15.09	1.47
<i>P</i>	CO ₂	ns	<0.01	0.04	ns
	N	<0.001	<0.01	ns	ns
	CO ₂ ×N	ns	0.01	ns	ns

机碳储量平均减少 6.41% ($P<0.01$), 其余各级团聚体有机碳储量均有不同程度的增加, 其中微团聚体有机碳储量显著增加 15.09% ($P<0.05$)。常氮水平下, 粗大团聚体有机碳储量平均降低 26.89% ($P<0.001$), 细大团聚体有机碳储量平均降低 6.22% ($P<0.01$)。CO₂ 和 N 交互显著降低耕层 (0 ~ 15 cm) 水稻土细大团聚体有机碳储量 ($P=0.01$)。

3 讨论

大气 CO₂ 浓度连续升高 9 年后, 稻田土壤有机碳总量、团聚体的分布和有机碳量发生了改变。这一系列变化的原因很多: CO₂ 浓度升高后, 植物光合作用增强, 地上部和地下部生物量增加, 直接向土壤输入的碳的质和量发生变化; 根系生长增加, 其分泌物对团聚体有胶结作用, 发达的根系对团聚体也具有穿插包裹作用; 土壤微生物活性增强, 一方面对土壤有机碳分解作用加强, 另一方面微生物分泌物又是团聚体胶结物质等。

高 CO₂ 浓度处理增加了土壤总有机碳的含量。这主要是由于高 CO₂ 浓度下植物光合作用增强, 地上部分和地下部分生物量增加^[22-23], 从而向土壤输入的碳增多; 寇太记等^[24]利用中国 FACE 平台采用 ¹³C 同位素法对稻田土壤碳周转的研究也表明高 CO₂ 浓度处理显著增加了土壤呼吸中源于新有机碳分解的贡献, 而降低了原有机碳分解对土壤呼吸的贡献, 这对增加土壤碳积累有积极作用。

高 CO₂ 浓度处理影响了土壤中不同粒级团聚体的数量, 尤其是 0 ~ 5 cm 土层。高 CO₂ 浓度处理 9 年后, 0 ~ 5 cm 土层土壤大团聚体 (>250 μm) 含量趋于减少, 微团聚体 (250 ~ 53 μm) 含量显著增加, 这与马红亮等^[25]在 FACE 平台运行两年后的观测结果一致; 且 0 ~ 5 cm 土壤以微团聚体为主, 该团聚体含量明显高于其他粒级团聚体^[26]。高 CO₂ 浓度处理导致大团聚体向微团聚体分配的原因可能是:

高 CO₂ 浓度条件下植物根系发达, 其穿插作用大; 以凋落物、根系及其分泌物等形式进入土壤的新鲜有机物多, C/N 高^[12-13], 微生物倾向于利用这部分的碳^[27], 将较大的团聚体分解破碎成较小的团聚体^[28]; ③微生物优先利用新输入的有机物, 将其分解、破裂, 破裂后的成分以及根系和微生物分泌物在大团聚体内部与原生矿物颗粒结合在一起, 初步形成微团聚体^[29-30], 一定条件下这种微团聚体将从大团聚体中释放出来。5 ~ 15 cm 土壤主要以 >53 μm 团聚体为主, 高 CO₂ 浓度处理对 5 ~ 15 cm 土壤不同粒级团聚体数量的影响不大, 原因可能是水稻根系主要分布于浅层土壤 (0 ~ 5 cm) 中, 5 ~ 15 cm 土壤受 CO₂ 升高的直接、间接作用小^[10]; 常氮下 5 ~ 15 cm 土壤粗大团聚体显著减少的原因可能与高 CO₂ 浓度处理类似, 改变了一些植物和微生物性质^[31], 从而对大团聚体的破坏增加。

高 CO₂ 处理 9 年后, 两层土壤有机碳浓度均以细大团聚体最高, 粗大团聚体次之, 微团聚体居中, 黏砂粒最低, 与马红亮等^[23]的研究结果一致。土壤有机碳主要赋存于微团聚体和细大团聚体中, 这与 Maysoon 和 Charles^[32]和李恋卿等^[33]的研究结果一致; 黏砂粒 (<53 μm) 中有机碳含量均最低^[34]。由于微团聚体百分含量最高, 即使其有机碳浓度不高, 但其有机碳含量却仅次于细大团聚体。微团聚体有机碳含量小于细大团聚体的原因可能与微团聚体的形成机制有关: 有机质是团聚体形成的主要黏结剂, 有机物与矿质颗粒相互胶结形成微团聚体, 微团聚体与周围的基本粒子或微团聚体之间相互胶结形成大团聚体, 同时大团聚体内部的颗粒有机质分解、大团聚体解体, 微团聚体释放出来^[35], 即微团聚体中有机碳比大团聚体中的有机碳形成时间早, 大团聚体比微团聚体有机碳含量更高一些^[36]。Angers 等^[37]运用 ¹³C、¹⁵N 对团聚体内的 C、N 进行追踪, 发现碳有从大团聚体向微团聚体分配的现象, 再次表明微团聚体在大

团聚体中形成再从大团聚体中释放出来^[38]。高 CO₂ 浓度处理降低了 0 ~ 5 cm 土壤细大团聚体的有机碳含量,增加了微团聚体有机碳含量。虽然微团聚体有机碳浓度低于大团聚体,但高 CO₂ 浓度下微生物优先利用新输入的新鲜有机物,大团聚体周转快,微团聚体不断增多,从而使得微团聚体有机碳含量增加。高 CO₂ 浓度处理显著增加 5 ~ 15 cm 土壤粗大团聚体有机碳含量(常氮下),显著降低细大团聚体有机碳含量,是由于高 CO₂ 浓度处理对 5 ~ 15 cm 土壤大团聚体有机碳浓度的影响,这可能和高 CO₂ 下输入不同团聚体有机物的化学特性有关。常氮降低 5 ~ 15 cm 土壤粗大团聚体有机碳含量是由于常氮对粗大团聚体数量的影响,这表明常氮对 5 ~ 15 cm 土壤粗大团聚体的破坏作用大,其有机质分解增加,这对土壤有机质的积累不利。总体而言,高 CO₂ 浓度处理对耕层水稻土微团聚体有机碳储量的正效应大于其对细大团聚体有机碳储量的负效应,而微团聚体内的有机碳分解慢^[35],所以长远来看,高 CO₂ 浓度对未来气候下土壤固碳有积极意义。

4 结论

大气 CO₂ 浓度连续升高 9 年后,稻田土壤有机碳含量显著增高,年均增幅为 1%。高 CO₂ 浓度处理对 0 ~ 5 cm 土层土壤影响较大:首先,高 CO₂ 浓度处理使得稻田土壤大团聚体周转加快,微团聚体含量显著增加;其次,高 CO₂ 浓度处理增加了更为稳定的微团聚体有机碳含量。施氮水平对 5 ~ 15 cm 土层土壤影响较大:常氮显著减少粗大团聚体数量及其有机碳含量。高 CO₂ 浓度处理显著增加耕层土壤(0 ~ 15 cm)微团聚体的有机碳储量,增幅为 15.09%,大于其对细大团聚体有机碳储量的降低作用 6.41%,这对土壤固碳有积极意义。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 1-20
- [2] Reddy AR, Rasineni GK, Raghavendra AS. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity[J]. Current Science, 2010, 99(1): 46-56
- [3] Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP, Ort DR. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(10): 2 859-2 876
- [4] Lee M, Manning P, Rist J, Power SA, Marsh C. A global comparison of grassland biomass responses to CO₂ and nitrogen enrichment[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 2010, 365(1 549): 2 047-2 056
- [5] Sillen WMA, Dieleman WIJ. Root biomass responses to elevated CO₂ limit soil carbon sequestration in managed grassland[J]. Biogeosciences Discuss, 2012, 9(1): 357-386
- [6] Perveen N, Barot SE, Alvarez G, Klumpp K, Martin R, Rapaport A, Herfurth D, Louaault F, Fontaine S. Priming effect and microbial diversity in ecosystem functioning and response to global change: A modeling approach using the SYMPHONY model[J]. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1 174-1 190
- [7] Drake JE, Gallet-Budynek A, Hofmockel KS, Bernhardt ES, Billings SA, Jackson RB, Johnsen KS, Lichter J, McCarthy HR, McCormack ML, Moore DJ, Oren R, Palmroth S, Phillips RP, Phippen JS, Pritchard SG, Treseder KK, Schlesinger WH, Delucia EH, Finzi AC. Increases in the flux of carbon belowground stimulate nitrogen uptake and sustain the long-term enhancement of forest productivity under elevated CO₂[J]. Ecology Letters, 2011, 14(4): 349-357
- [8] Iversen CM, Keller JK, Garten CT, Norby RJ. Soil carbon and nitrogen cycling and storage throughout the soil profile in a sweetgum plantation after 11 years of CO₂-enrichment[J]. Global Change Biology, 2012, 18(5): 1 684-1 697
- [9] de Graaff MA, van Groenigen KJ, Six J, Hungte B, van Kessel C. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2 077-2 091
- [10] Jastrow JD, Miller RM, Matamalai R, Norby RJ, Boutton TW, Rice CW, Owensby CE. Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon[J]. Global Change Biology, 2005, 11(12): 2 057-2 064
- [11] Lindsey ER, Thomas GH, Richard DB. Controls on soil respiration: Implications for climate change[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 1-6
- [12] Alekseeva TV, Sokolowska Z, Hajnos M, Kalinin PI. Water stability of aggregates in subtropical and tropical soils (Georgia and China) and its relationships with the mineralogy and chemical properties[J]. Eurasian Soil Science, 2009, 42(4): 415-425
- [13] Six J, Conant RT, Paul EA. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176
- [14] Ceschia E, Béziat P, Dejoux JF, Aubinet M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139(3): 363-383
- [15] Li ZP, Liu M, Wu XC, Han FX, Zhang TL. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 268-274

- [16] Ayuke FO, Brussaard L, Vanlauwe B, Six J, Lelei DK, Kibunja CN, Pulleman MM. Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(1): 53–62
- [17] von Lützow, Kögel-Knabner M, Ekschmitt I, Flessa K, Guggenberger H, Matzner G, Marschner E. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2 183–2 207
- [18] Eviner VT, Chapin III FS. The influence of plant species, fertilization and elevated CO₂ on soil aggregate stability[J]. *Plant and Soil*, 2002, 246(2): 211–219
- [19] Biermann A, Engel A. Effect of CO₂ on the properties and sinking velocity of aggregates of the coccolithophore *Emiliania huxleyi*[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(3): 1 017–1 029
- [20] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1 253–1 258
- [21] Elliott ET. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633
- [22] 谢祖彬, 朱建国, 张雅丽, 马洪亮, 刘钢, 曾青, 蔡祖聪. 水稻生长及其体内 C, N, P 组成对开放式空气 CO₂ 浓度增高和 N, P 施肥的响应[J]. *应用生态学报*, 2002, 11(2): 163–166
- [23] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 张雅丽, 曾青. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(12): 1 634–1 639
- [24] 寇太记, 苗艳芳, 庞静, 朱建国, 谢祖彬. 农田土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1 667–1 673
- [25] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 曾青. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤中不同粒级碳的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2006, 1(1): 33–40
- [26] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412–418
- [27] Eric P, Barry T, Andrew JM, Shona MO, Allan S, Pete M. Atmospheric CO₂ enrichment and nutrient additions to planted soil increase mineralization of soil organic matters, but do not alter microbial utilization of plant- and soil C-sources[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2008, 40(9): 2 434–2 440
- [28] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 于树, 朱平. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 369–373
- [29] Oades JM. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76(1–3): 319–337
- [30] Benbi DK, Senapati N. Soil aggregation and carbon and nitrogen stabilization in relation to residue and manure application in rice-wheat systems in northwest India[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 87(2): 233–247
- [31] Oren R, Sperry JS, Ewers BE, Pataki DE, Phillips N, Megonigal JP. Sensitivity of mean canopy stomatal conductance to vapor pressure deficit in a flooded *Taxodium distichum* L. forest: Hydraulic and non-hydraulic effects[J]. *Oecologia*, 2001, 126(1): 21–29
- [32] Maysoon MM, Charles WR. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809–816
- [33] 李恋卿, 潘根兴, 龚伟, 孙玉华, 张旭辉. 太湖地区几种水稻土的有机碳储存及其分布特性[J]. *科技通报*, 2000, 11(6): 421–426
- [34] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422–429
- [35] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2 099–2 013
- [36] Jastrow JD, Boutton TW, Miller RM. Carbon dynamic of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 801–807
- [37] Angers DA, Recous S, Aita C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C¹⁵N-labelled wheat straw *in situ*[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(2): 295–300
- [38] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7–31

Effects of Elevated CO₂ on Soil Aggregation and Soil Organic Carbon Allocation in a Rice Paddy Field

XU Qiao^{1,2}, ZHU Jian-guo^{1*}, ZHU Chun-wu¹, LIU Gang¹, ZENG Qing¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on dry and wet sieving sequences, water-stable aggregates were separated from bulk soils sampled at Chinese FACE (Free-air CO₂ enrichment) Platform. The experiment was set as two main treatments: atmospheric CO₂ and elevated CO₂ and two sub-treatments: low amount of nitrogen fertilizer (LN) and normal amount of nitrogen fertilizer (NN). The effects of elevated CO₂ on soil aggregation, soil organic carbon contents (SOC) in aggregates were studied and analyzed. It showed that after 9 years, elevated CO₂ increased soil organic carbon by 1% per year. At the 0 – 5 cm soil depth, macroaggregates (>250 μm) tended to break down and thus forming more microaggregates (250 – 53 μm) (27.49%, $P = 0.05$) under elevated CO₂; NN decreased the amount of large macroaggregates (>2 000 μm) of 5 – 15 cm soil by 20.60% ($P < 0.05$). Elevated CO₂ had a positive effect on SOC in microaggregates (31.30%, $P < 0.05$), and a negative effect on SOC in small macroaggregates (2 000 – 250 μm) (9.67%, $P < 0.01$) at 0 – 5 cm soil depth; the interaction effect of CO₂ and N had a trend to enhance such changes. Elevated CO₂ increased SOC of large macroaggregates (26.44%, $P = 0.05$) and decreased SOC of small macroaggregates (6.83%, $P < 0.01$) at the 5 – 15 cm soil depth; NN decreased SOC in large macroaggregates at 5 – 15 cm soil depth by 30.19% ($P < 0.001$); the interaction effect of CO₂ and N decreased SOC in macroaggregates. Elevated CO₂ decreased the storage of SOC in small macroaggregates (6.41%, $P < 0.01$) and increased the storage of SOC in microaggregates (15.09%, $P < 0.05$) of surface soil (0 – 15 cm); NN decreased the storage of SOC in macroaggregates; the interaction effect of CO₂ and N decreased the storage of SOC in small macroaggregates ($P < 0.05$).

Key words: Elevated CO₂, Aggregate separation, Organic carbon, Paddy soil