

DOI: 10.5846/stxb201306081446

杨悦, 鲍雪莲, 鲁彩艳, 梁翠影, 梁文举, 李琪. 增施氮肥能够缓解麦田土壤线虫群落对 O_3 浓度升高的响应. 生态学报, 2015, 35(8): 2494-2501.

Yang Y, Bao X L, Lu C Y, Liang C Y, Liang W J, Li Q. N fertilization regulates the response of soil nematode communities to elevated O_3 in a wheat field. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2494-2501.

增施氮肥能够缓解麦田土壤线虫群落对 O_3 浓度升高的响应

杨 悦^{1,2}, 鲍雪莲^{1,2}, 鲁彩艳¹, 梁翠影¹, 梁文举¹, 李 琪^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164

2 中国科学院大学, 北京 100039

摘要:在辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 利用运行 2a 的开顶式气室, 研究了臭氧(O_3) 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫群落的影响。结果表明: (1) O_3 浓度升高降低了成熟期小麦根生物量。 O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用改变了小麦成熟期土壤微生物生物量碳、氮和水溶性有机碳的含量。低氮条件下, O_3 浓度升高降低了土壤微生物生物量碳、氮和水溶性有机碳的含量; 而高氮条件下则表现出相反的趋势。(2) O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫总数没有产生显著影响, 而在灌浆期, 食细菌线虫和食真菌线虫中 c-p 值为 4 (Ba4 and Fu4) 的功能团对 O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平的响应敏感; 与对照相比, 不同氮处理中, O_3 浓度升高均降低了灌浆期 Ba4 功能团线虫的数量。灌浆期, O_3 浓度升高条件下, 与对照相比 Fu4 功能团线虫数量在高氮条件下表现出增加的趋势, 而在低氮条件表现出降低的趋势。(3) O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用显著影响了小麦灌浆期线虫的成熟度指数 (MI) 和结构指数 (SI)。与对照相比, 线虫成熟度指数和结构指数在低氮条件下随 O_3 浓度升高而降低; 而在高氮条件下随 O_3 浓度升高而升高。上述结果表明, 氮肥的施用能够缓解 O_3 浓度升高对土壤食物网的扰动。

关键词: O_3 浓度升高; 氮肥施用; 线虫群落; 麦田; 开顶式气室

N fertilization regulates the response of soil nematode communities to elevated O_3 in a wheat field

YANG Yue^{1,2}, BAO Xuelian^{1,2}, LU Caiyan¹, LIANG Cuiying¹, LIANG Wenju¹, LI Qi^{1,*}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110164, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: We evaluated the effects of elevated O_3 and different N fertilization on soil nematode communities in a wheat field using the open top chambers (OTC) in National Field Research Station of Shenyang Agroecosystems. The results showed that (1) elevated O_3 decreased the root biomass at wheat ripening stage. The interactive effects between elevated O_3 and N fertilization changed soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and dissolved organic carbon (DOC) at ripening stage, which were decreased by the elevated O_3 under low nitrogen treatment and increased under high nitrogen treatment. (2) Elevated O_3 and N fertilization did not affect the total nematode abundance. While at wheat filling stage, nematode functional guilds belonging to bacterivores and fungivores with c-p 4 values (Ba 4 and Fu 4) were sensitive to elevated O_3 and N fertilization. At wheat filling stage, the numbers of Ba4 were decreased in the elevated O_3 treatments in comparison with control, this trend regardless of N conditions. Following the elevated O_3 , the functional

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31270487, 41101242)

收稿日期: 2013-06-08; 网络出版日期: 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liq@iae.ac.cn

guilds of Fu4 were increased in high nitrogen treatment, while decreased under low nitrogen treatment at filling stage. (3) Analysis of the ecological indices indicated that effects of elevated O₃ and N fertilization might change the structure of soil micro-food web. Following elevated O₃, nematode maturity and structural indices were decreased under low nitrogen treatment and increased under high nitrogen treatment, which suggest that high nitrogen fertilization may relieve the disturbance of elevated O₃ on soil micro-food web.

Key Words: Elevated ozone; Nitrogen fertilization; Nematode communities; Wheat field; Open-Top Chamber

近地层臭氧(O₃)作为一种主要的空气污染物,其主要来源于大气光化学过程,即在太阳光照射下,当氮氧化物(NO_x)气体存在时,有机挥发物(VOC_s)和一氧化碳(CO)被光化学氧化产生^[1]。近几十年来,由于工业发展、化石燃料的燃烧以及汽车尾气的大量排放,使大气中NO_x和VOC_s急剧增加,进而导致了大气O₃浓度持续升高。有研究显示,地面O₃浓度每年大概升高0.5%—2.5%^[2],O₃浓度的升高势必对生态系统产生严重影响。近年来,关于O₃浓度升高对地上生态系统影响的研究已取得了一定进展。朱新开等^[3]利用FACE研究平台发现,O₃浓度升高显著降低小麦籽粒产量,不同品种的平均降幅为19.74%。O₃浓度升高不仅能对植物生长产生显著影响,而且也能改变植物群落组成及碳在地下生态系统的分配,进而影响整个地下生态过程。王曙光等^[4]研究表明O₃浓度增加,使作物生长后期根区土壤微生物数量减少,丛枝菌根数量下降。低、高浓度O₃分别使AM外生菌丝量比自然浓度时下降48.7%和85.6%。地下生态系统的响应也能够对地上生态系统产生正或负的反馈作用^[5]。李全胜等^[6]研究发现,近地层O₃浓度升高条件下,稻田土壤氮素转化因为水稻对氮素的吸收增强而加快,土壤氨氧化细菌和反硝化细菌的数量增多,但其生理代谢活性下降。陈展等^[7]研究发现,O₃浓度升高后小麦根系生物量及根冠比都降低,根系活力显著低于对照。

氮肥作为作物生长的重要营养元素,其施入量的改变能够对作物生长产生影响。增施氮肥在一定程度上能够增加植物的生物量、产量,从而缓解O₃对植物的危害^[8-9]。陈娟等^[8]研究发现增施氮肥可以增加小麦灌浆期可溶性蛋白的含量,缓解O₃对小麦光合作用和产量的影响。Watanabe等^[9]研究表明,O₃浓度增加显著降低栲树(*Castanopsis sieboldii*)幼苗的光合速率和总干重,而增施氮肥后,幼苗的光合速率和总干重均显著增加。

综上所述,O₃浓度升高和不同氮肥施用水平对生态系统影响的研究多集中于地上部分,而对地下生态过程的研究仍鲜有报道。罗克菊^[10]在中国稻麦轮作开放式臭氧浓度升高平台(FAOE)的研究表明增施N肥可以减轻O₃对两种不同O₃耐受品种水稻SY63和YD6的净光合速率(*P_n*)的影响,且前期增施N肥效果更显著。陈娟等^[11]的研究表明,O₃胁迫下,常氮水平小麦根、叶和穗干物质量以及根冠比与对照相比均显著降低,而增施氮肥后,小麦根叶穗及根冠比与常氮下相比均显著增加,增幅分别为60.5%、23.2%、10.7%、43.6%。以往的研究仅是针对不同O₃耐受品种,开展的土壤线虫群落对O₃浓度升高的单一胁迫响应研究^[12],关于O₃浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用研究较少。土壤线虫作为土壤中最丰富的后生动物,在土壤碳、氮循环中起着重要的调节作用^[13],是农田生态系统腐屑食物网的重要组成部分,能够敏感地反映环境状况等变化。本文利用开顶式气室(Open-Top Chamber,OTC)平台,开展O₃浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫群落结构的影响研究,探明土壤腐屑食物网分解通路的变化特征,从而有助于揭示大气O₃浓度升高和不同氮肥施用水平对地下生态过程的影响机理。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站(41°31'N,123°22'E)。地处下辽河平原中部偏东,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温7—8℃,夏季平均气温24℃。年总辐射量为5392.2—

5643.0 kJ/cm², 年降水量 650—700mm, 年蒸发量 1480—1756mm, 无霜期 147—164 d。土壤类型为潮棕壤, pH 值 6.7, 土壤有机碳含量为 11.28g/kg, 全氮含量 1.20g/kg, 全磷含量 0.41g/kg, 速效磷含量为 8.91mg/kg。

1.2 试验设计

本试验采用 6 个结构和性能完全相同的开顶式气室 OTC (直径 300 cm, 高 280 cm) 进行试验, OTC 系统于 2010 年开始运行通气, 研究 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平单一和复合作用对土壤线虫群落结构的影响。试验为裂区设计, 两个主处理, 分别为 O₃ 对照处理, 自然 O₃ 浓度约 0.04 μL/L 和 O₃ 浓度升高处理, O₃ 浓度为 0.06 μL/L, 每天通气 7h; 每个主处理的 OTC 内分别设置两个不同氮肥水平的副处理, 该地常规施氮水平为 150Nkg/hm², 该水平也即本试验的低氮水平, 高氮水平 (225 Nkg/hm²) 在常规水平基础上增施氮肥 75Nkg/hm², 增施氮肥占总施肥量的 50%, 施入尿素和二铵肥, 以基肥的形式一次施入。每个处理 3 次重复。本试验于 2010 年 5 月 14 日开始通气, 小麦收获后通气结束, O₃ 每天通气 7h (9:00—18:00, 雨天停止通气), 试验期内气体浓度由计算机自动控制。各处理其它农田管理措施均相同, 无病虫害及杂草的影响。试验作物为春小麦, 品种为辽春 10, 2011 年 4 月 2 日播种, 行距 25cm, 基本苗 225 万株/hm², 施入磷肥 (P₂O₅) 40kg/hm², 钾肥 (K₂O) 60kg/hm²。分别于小麦灌浆期 (2011 年 6 月 20 日), 小麦成熟期 (2011 年 7 月 11 日) 取样, 在小麦根际, 使用直径为 2.5cm 的土钻在每个样地上采用 5 点法取样, 混合后装入样袋中, 取样深度为 0—15cm。将采取的土壤样品在塑料袋中混匀后, 带回实验室放置于 4℃ 冰箱中保存, 随后对采集土壤样品进行分析测定。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化指标的测定

土壤 pH 值采用电位法测定 (土水比为 1:2.5); 水溶性有机碳采用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 按土水比为 1:10 浸提, 利用 TOC 分析仪测定; 微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸法-K₂SO₄ 浸提法, 用 Micro C/N 分析仪进行测定, 微生物生物量碳、氮的转化系数分别为 0.38 和 0.54。土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 利用连续流动分析仪测定。

1.3.2 土壤线虫的提取与鉴定

土壤线虫的分离提取采用浅盘法, 60℃ 温热杀死后, 用 4% 福尔马林固定, 线虫总数通过解剖镜直接测定, 然后按测得的土壤水分, 折算成 100 g 干土中土壤线虫的数量。从每个样品中随机抽取 100 条线虫 (不足 100 条的全部鉴定), 在光学显微镜下进行科属鉴定^[14]。线虫 c-p 类群及功能团的划分依据 Bongers^[15] 及 Bongers 等^[16]。根据线虫的取食习性和食道特征将其划分为 4 个营养类群: 食细菌线虫、食真菌线虫、植物寄生线虫和捕食/杂食线虫^[14]。

1.3.3 生态指数的计算

1) 丰富度指数^[17]

$$SR = (S - 1) / \ln N$$

式中, S 为鉴定分类单元的数目, N 为线虫的个体总数。

2) 线虫通路比值^[18]

$$NCR = B / (B + F)$$

式中, B 和 F 分别为食细菌线虫和食真菌线虫数量占线虫总数的相对多度。

3) 线虫成熟度指数包括: 自由生活线虫成熟度指数 MI ^[15]; 植物寄生线虫成熟度指数 PPI ^[15]。

$$MI = \sum v(i) f(i)$$

式中, $v(i)$ 为第 i 种线虫的 c-p 值, $f(i)$ 为第 i 种线虫的个体数占总个体数的比例; PPI 的计算公式同 MI , 为植物寄生线虫的成熟度指数。

4) Ferris 等^[19] 在线虫功能团划分的基础上提出了线虫区系分析的方法用来反映土壤食物网结构、土壤养分富集状况和分解途径等信息。

$$\text{富集指数}^{[19]}: EI = 100 \times (e / (e + b))$$

$$\text{结构指数}^{[19]}: SI = 100 \times (s / (b + s))$$

基础指数^[19]:

$$BI = 100 \times (b / (e + b + s))$$

式中, b (basal) 代表食物网中的基础成分, 主要指 Ba2 和 Fu2 这两个类群 (即食细菌线虫和食真菌线虫中 c_p 值为 2 的类群); e 代表食物网中的富集成分, 主要指 Ba1 和 Fu2 这两个类群 (即食细菌线虫中 c_p 值为 1 和食真菌线虫中 c_p 值为 2 的类群); s 代表食物网中的结构成分, 分别为食细菌线虫、食真菌线虫和杂食线虫中 c_p 值为 3—5 的类群以及捕食线虫中 c_p 值为 2—5 的类群, b 、 e 和 s 对应的值分别为 $\sum k_b n_b$, $\sum k_e n_e$ 和 $\sum k_s n_s$, 其中 k_b , k_e 和 k_s 为各类群所对应的加权数 (其值在 0.8—5.0 之间), 而 n_b 、 n_e 和 n_s 则为各类群的相对多度。

1.4 统计分析

土壤理化指标和土壤线虫均以平均数±标准误形式表示; 土壤线虫数量先进行对数转换 $\ln(X+1)$, 然后用统计软件 SPSS16.0 进行不同采样时期的裂区方差分析 (主区为 O₃ 浓度, 裂区为氮肥水平), 显著性为 0.05 和 0.01。

2 结果与分析

2.1 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤理化特性的影响

O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对 pH、铵态氮 (NH₄⁺-N) 和小麦地上茎的生物量 (Shoot) 均没有产生显著影响 (表 1), 而 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用显著改变了小麦成熟期土壤微生物量碳 (MBC), 微生物生物量氮 (MBN) 和水溶性有机碳 (DOC) 的含量 ($P < 0.05$)。在低氮条件下, O₃ 浓度升高降低了土壤 MBC、MBN 和 DOC 的含量 ($P < 0.05$); 而在高氮条件下则表现出相反的趋势, 均随 O₃ 浓度的升高而略有增加。同时, O₃ 浓度升高还显著降低了小麦成熟期的根生物量 ($P < 0.05$)。此外, 不同氮肥施用水平对小麦灌浆期土壤硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量也产生了显著影响, 无论是对照还是 O₃ 升高处理, 高氮处理硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量均高于低氮处理。

表 1 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤理化指标的影响

Table 1 Effect of elevated O₃ and N fertilization on soil physicochemical properties

指标 Index	采样时期 Date	处理 Treatment				效应 Effect		
		低氮 Low N		高氮 High N		臭氧 O ₃	施氮 N	臭氧×施氮 O ₃ ×N
		臭氧 O ₃	对照 CK	臭氧 O ₃	对照 CK			
pH	灌浆期	7.03±0.11	7.01±0.22	6.89±0.06	7.36±0.09	ns	ns	ns
	成熟期	6.94±0.17	7.06±0.22	6.83±0.10	7.18±0.19	ns	ns	ns
MBC/(mg/kg)	灌浆期	132.62±5.24	199.34±24.13	136.11±11.47	124.57±11.00	*	ns	ns
	成熟期	116.82±11.13	182.12±14.88	212.61±3.82	187.53±10.97	ns	*	*
MBN/(mg/kg)	灌浆期	19.20±4.23	24.70±3.60	24.29±2.86	18.46±0.84	ns	ns	ns
	成熟期	10.78±2.06	20.92±0.39	24.25±0.00	18.67±1.62	ns	*	* *
DOC/(mg/kg)	灌浆期	45.51±3.21	45.39±2.53	54.18±1.40	48.27±2.01	ns	ns	ns
	成熟期	48.66±2.42	60.69±0.52	58.12±2.22	52.68±3.28	ns	ns	*
NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)	灌浆期	21.43±0.48	21.27±3.68	44.00±5.22	35.91±4.57	ns	*	ns
	成熟期	25.35±3.95	20.70±3.19	49.17±9.56	36.23±7.10	ns	ns	ns
NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	灌浆期	7.21±0.21	8.19±0.30	8.26±0.91	7.08±0.08	ns	ns	ns
	成熟期	9.27±0.60	10.39±0.72	9.06±0.95	10.12±0.97	ns	ns	ns
Shoot/g	灌浆期	8.49±1.24	15.09±2.92	10.44±3.44	14.45±2.02	ns	ns	ns
	成熟期	13.59±1.87	16.38±3.38	13.13±1.51	18.11±3.06	ns	ns	ns
Root/g	灌浆期	0.39±0.02	0.66±0.24	0.45±0.12	0.81±0.10	ns	ns	ns
	成熟期	0.49±0.08	0.61±0.09	0.25±0.03	0.64±0.10	*	ns	ns

* * 和 * 分别表示显著性水平为 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$; ns 表示无显著性差异; MBC: Microbial biomass carbon 土壤微生物生物量碳; MBN: Microbial biomass nitrogen 土壤微生物生物量氮; DOC: dissolved organic carbon 水溶性有机碳; NO₃⁻-N: 硝态氮; NH₄⁺-N: 铵态氮; Shoot: 地上部生物量; Root: 地下部生物量

2.2 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫群落组成的影响

对土壤线虫总数的分析表明, 小麦成熟期土壤线虫总数略高于灌浆期 (图 1)。线虫总数的最大值和最小

值为 822 条/g 干土和 472 条/g 干土, 分别出现在成熟期的高氮 O₃ 处理和灌浆期的高氮对照处理中。统计分析表明, O₃ 浓度升高和不同施氮处理对土壤线虫总数没有产生显著影响。

本研究共发现土壤线虫功能团 12 个(表 2), 分别为食细菌线虫中 c-p 值为 1—4 的功能团(Ba1、Ba2、Ba3 和 Ba4), 食真菌线虫中 c-p 值为 2 和 4 的功能团(Fu2 和 Fu4), 植物寄生线虫中 c-p 值为 2 和 3 的功能团(H2 和 H3), 捕食线虫中 c-p 值为 2 和 4 的功能团(Ca2 和 Ca4) 和杂食线虫中 c-p 值为 5 的功能团(Om5)。统计分析结果表明, 小麦灌浆期食细菌线虫中的 Ba4 和食真菌线虫中的 Fu4 功能团对 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平反应敏感。与对照相比, 不同氮水平下 O₃ 浓度升高均降低了功能团 Ba4 的数量。此外, O₃ 浓度升高和氮肥的交互作用对食真菌线虫的 Fu4 功能团产生显著影响($P < 0.01$)。在高氮条件下, O₃ 浓度升高增加了 Fu4 的数量; 而在低氮条件下, O₃ 浓度升高使其数量降低。

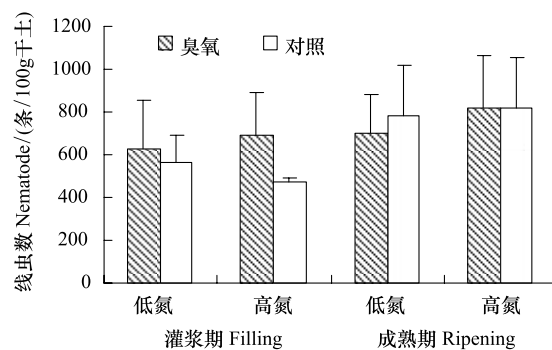


图 1 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫总数的影响

Fig. 1 Effects of elevated O₃ and N fertilization on the total nematode abundance

表 2 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对线虫功能团和营养类群的影响

Table 2 Effect of elevated O₃ and N fertilization on nematode functional guilds and tropic groups

功能团及营养类群 Functional guild and tropic group	采样时期 Date	处理 Treatment				效应 Effect		
		低氮 Low N		高氮 High N		臭氧 O ₃	施氮 N	臭氧×施氮 O ₃ ×N
		臭氧 O ₃	对照 CK	臭氧 O ₃	对照 CK			
Ba1	灌浆期	68±30	31±16	61±50	24±11	ns	ns	ns
	成熟期	63±40	87±58	76±25	52±17	ns	ns	ns
Ba2	灌浆期	124±8	95±50	168±3	154±15	ns	ns	ns
	成熟期	258±51	229±51	225±34	214±70	ns	ns	ns
Ba3	灌浆期	5±3	5±3	8±1	4±4	ns	ns	ns
	成熟期	5±3	8±8	8±8	2±2	ns	ns	ns
Ba4	灌浆期	2±2	21±10	2±2	5±0	*	ns	ns
	成熟期	5±2	24±17	11±7	10±6	ns	ns	ns
食细菌线虫 Bacterivores	灌浆期	199±23	152±56	239±51	188±17	ns	ns	ns
	成熟期	331±68	349±115	279±73	321±60	ns	ns	ns
Fu2	灌浆期	64±10	51±25	81±23	65±11	ns	ns	ns
	成熟期	84±8	76±14	132±54	95±6	ns	ns	ns
Fu4	灌浆期	48±17	59±14	132±54	24±10	ns	ns	**
	成熟期	59±20	58±41	70±16	72±45	ns	ns	ns
食真菌线虫 Fungivores	灌浆期	112±23	110±37	193±64	89±1	ns	ns	ns
	成熟期	143±19	134±54	151±39	167±41	ns	ns	ns
H2	灌浆期	64±39	99±84	122±53	52±31	ns	ns	ns
	成熟期	70±40	656±618	155±37	148±125	ns	ns	ns
H3	灌浆期	220±175	160±22	112±37	108±28	ns	ns	ns
	成熟期	126±175	300±22	143±46	158±99	ns	ns	ns
植物寄生线虫 Plant-parasites	灌浆期	284±98	259±65	233±86	161±4	ns	ns	ns
	成熟期	196±93	271±84	299±140	306±129	ns	ns	ns
Ca2	灌浆期	0±0	0±0	0±0	0±0	ns	ns	ns
	成熟期	1±1	0±0	0±0	0±0	ns	ns	ns
Ca4	灌浆期	31±10	37±14	27±10	32±5	ns	ns	ns
	成熟期	28±17	32±2	47±9	67±33	ns	ns	ns
Om5	灌浆期	5±3	5±5	0±0	2±2	ns	ns	ns
	成熟期	0±0	0±0	4±4	0±0	ns	ns	ns
捕食-杂食线虫 Omnivore-predators	灌浆期	36±7	42±19	27±10	33±7	ns	ns	ns
	成熟期	29±16	32±2	52±11	67±33	ns	ns	ns

2.3 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对线虫生态指数的影响

对线虫生态指数的研究表明,小麦灌浆期 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对线虫生态指数的影响比较明显,其中 O₃ 浓度升高降低了土壤线虫属的丰富度(SR)(表 3)。而 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用改变了线虫通路比值(NCR),低氮条件下,O₃ 浓度升高增加了 NCR 的比值,而高氮条件下,其随 O₃ 浓度升高而呈降低的趋势,*t* 检验下二者之间的差异达到了显著水平,表明细菌为主的有机质分解通道受抑制。在线虫群落水平上,O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用显著影响了小麦灌浆期自由生活线虫成熟度指数(MI)和结构指数(SI);与对照相比二者的变化类似,即低氮条件下,O₃ 浓度升高降低了 MI 和 SI,而高氮条件下,二者随 O₃ 浓度的升高而升高,表明氮肥的施用能够缓解 O₃ 浓度升高对土壤食物网的扰动。而线虫的基础指数(BI),在不同处理中则表现出与 SI 相反的趋势。

表 3 O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平对线虫生态指数的影响

Table 3 Effect of elevated O₃ and N fertilization on nematode ecological indices

指数 Index	采样时期 Date	处理 Treatment				效应 Effect		
		低氮 Low N		高氮 High N		臭氧 O ₃	施氮 N	臭氧×施氮 O ₃ ×N
		臭氧 O ₃	对照 CK	臭氧 O ₃	对照 CK			
丰富度	灌浆期	3.55±0.32	3.85±0.32	3.26±0.13	3.69±0.33	*	ns	ns
Species richness (SR)	成熟期	3.69±0.22	3.26±0.43	3.76±0.32	2.97±0.07	ns	ns	ns
线虫通路比值	灌浆期	0.65±0.03	0.56±0.04	0.57±0.03	0.68±0.02	ns	ns	*
Nematode channel ratio (NCR)	成熟期	0.69±0.02	0.71±0.07	0.69±0.02	0.62±0.01	ns	ns	ns
成熟度指数	灌浆期	2.34±0.07	2.79±0.09	2.58±0.11	2.36±0.08	ns	ns	*
Maturity index (MI)	成熟期	2.24±0.02	2.26±0.13	2.39±0.00	2.42±0.18	ns	ns	ns
植物寄生线虫成熟度指数	灌浆期	2.70±0.17	2.72±0.21	2.55±0.12	2.68±0.19	ns	ns	ns
Plant parasite index (PPI)	成熟期	2.71±0.12	2.66±0.24	2.62±0.16	2.60±0.23	ns	ns	ns
结构指数	灌浆期	65.59±3.04	79.89±4.35	69.84±9.03	54.47±4.81	ns	ns	*
Structural index (SI)	成熟期	49.40±8.05	59.41±3.17	63.84±3.05	56.85±16.10	ns	ns	ns
富集指数	灌浆期	58.44±12.09	53.13±11.17	45.15±14.57	40.54±6.49	ns	ns	ns
Enrichment index (EI)	成熟期	45.59±10.20	54.40±14.30	53.61±6.16	49.37±7.36	ns	ns	ns
基础指数	灌浆期	23.00±5.08	16.40±4.00	24.76±8.45	34.28±3.39	ns	* *	*
Basal index (BI)	成熟期	36.39±7.77	26.18±5.18	25.65±3.43	30.14±9.45	ns	ns	ns

3 讨论

O₃ 作为一种植物生长的胁迫因子,其浓度升高可引起植物的生理变化。现有的研究表明,O₃ 可以通过叶片上的气孔进入植物体内,伤害植物组织,降低其光合速率,从而降低其对养分的吸收能力,进而抑制植物生长,并通过改变碳在植物体内的分配,加速叶片衰老,最终降低植物生物量和产量^[20]。O₃ 一方面通过对植物的胁迫,直接抑制植物根的生长;另一方面,通过降低地上部的生长,从而减少地上向地下部分的分配^[5]。本研究发现,O₃ 浓度升高显著降低了小麦成熟期的根生物量。Kasuirnend^[21] 指出,O₃ 对植物地下部分的影响出现的比对地上部分的影响早,O₃ 升高能够显著降低根生物量。此外,O₃ 升高还能够改变碳水化合物向根系的分配^[22],进而影响根系的生长以及根冠比的变化。

植物根系是联系地上生态系统和地下生态系统的桥梁,植株通过光合作用固定的同化物以凋落物和根系分泌物等形式输入到土壤中^[23],而这些物质的组成和总量可因大气 O₃ 浓度的升高而发生变化,影响土壤生物的数量和活性,进而改变有机质的化学组成。我们的研究表明,O₃ 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用显著改变了小麦成熟期土壤 MBC、MBN 和 DOC 的含量。在低氮条件下,O₃ 浓度升高降低了土壤 MBC、MBN 和 DOC 的含量;而在高氮条件下则表现出相反的趋势。Larson 等^[24] 研究发现当平均 O₃ 浓度为 0.054 μmol/mol 时,温带森林土壤的微生物生物量碳(95 μg C/g)要比对照处理中土壤微生物量碳高

(70 $\mu\text{g C/g}$),但二者之间差异不显著。本试验中,与对照组相比, O_3 浓度升高显著降低了小麦的根生物量,因此,根系分泌物和土壤呼吸作用会因为根生物量的降低而减弱^[24-25],土壤微生物和线虫可以利用根系渗出物和植物凋落物作为其能量来源^[26],微生物生活所需的碳源和能源的减少将导致微生物生物量的减少,这进一步解释了土壤 MBC、MBN 和 DOC 的含量的降低。高氮条件,一方面由于一些微生物可以直接利用施入的氮素作为氮源,增加自身数量和活性。另一方面,土壤线虫在地下食物网中占有多个营养级,其组成和数量受自养生物(如植物)组成的影响^[26],而氮素是植物生长所需的最重要的元素,增施氮肥,能够通过促进植物的生长,进而对植物根系生长和根系分泌物等产生影响,从而对土壤微生物产生间接影响。陈展等^[7]研究发现,中等浓度 O_3 (75nL/L) 对根际和非根际土壤微生物量碳没有显著影响;高浓度 O_3 (110nL/L) 能使根际土壤微生物量 C 降低 9.3%,非根际土壤微生物量碳下降 5.3%,从而发现 O_3 对微生物生物量的降低作用与其对植物根系的作用密切相关。石春红等^[27]发现冬小麦在不同 O_3 浓度下,根际、非根际土壤细菌和真菌数量均随着生育期的推进呈先增加后降低的变化趋势, O_3 浓度的升高降低了土壤微生物的数量。而我们的研究结果表明,增施氮肥能够缓解 O_3 浓度升高对土壤微生物生物量和水溶性有机碳含量的影响。

研究发现, O_3 浓度升高对小麦土壤线虫群落组成的影响不同,同一营养类群的土壤线虫常常受季节变化的影响,这可能是由于土壤温湿状况的季节性变化影响了根际土壤生物群落^[22]。由于线虫在土壤食物网中的特殊地位,线虫不同营养类群对外界变化的响应也不同。在本研究中, O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平对土壤线虫总数并未产生显著影响,但对不同的线虫功能团影响显著。De Deyn^[28]的研究表明,在决定土壤食物网各组分的多样性方面,食物资源的质量比数量更重要,而植物物种的特性比植物物种的多样性更重要。在线虫的各功能群中,cp 值为 4 的线虫(Ba4 和 Fu4)为生活史世代较长,对环境变化敏感的一个功能群^[15]。本研究中,食细菌线虫中的 Ba4 和食真菌线虫中的 Fu4 功能团对 O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平响应最为敏感。与对照相比,不同氮水平下, O_3 浓度升高均降低了功能团 Ba4 的数量。高氮条件下, O_3 浓度升高增加了 Fu4 的数量;而低氮条件下, O_3 浓度升高使其数量降低。Fu4 功能团的这一变化趋势与微生物量的变化趋势一致。Li 等^[12]在连续通气 3a 的 FACE- O_3 平台中也发现了类似的现象,即 Ba4 和 Fu4 功能团对 O_3 浓度升高反应敏感。

本试验中,在小麦的灌浆期,在低氮条件下,相对于对照组, O_3 浓度升高使线虫通路比值(NCR)升高,即提高细菌分解途径的优势,而在高氮条件下,NCR 表现出相反的趋势,t 检验表明,在高氮条件下, O_3 浓度升高对线虫 NCR 的影响达到了显著水平。在线虫营养类群的比较中发现,不同处理水平下,食真菌线虫、食细菌线虫的数量均没有发生显著变化(表 2),然而,在灌浆期,高氮条件下, O_3 浓度升高使食真菌线虫的数量增加了 72.3%。该处理下, O_3 浓度升高使土壤 MBC、MBN 均呈现上升趋势(显著分析下并未达到显著水平),受食物资源质量和数量等上行作用的调控,食真菌线虫数量急剧上升,这可能是造成土壤线虫 NCR 降低的一个重要原因。 O_3 浓度升高条件下,根生物量的减少会直接改变进入土壤中有机质的数量^[29],进而可能会影响土壤腐屑食物网的结构和功能^[28]。土壤线虫是土壤地下食物网的重要组成部分,其种属的丰富度的变化受食物资源、空间限制以及捕食作用等的影响, O_3 通过对植物地上部分和地下部分的破坏和抑制作用,降低土壤线虫属的丰富度。在低氮条件下, O_3 浓度升高降低了线虫结构指数和成熟度指数,而在高氮条件下,二者随 O_3 浓度的升高而升高,表明增施氮肥能够缓解 O_3 浓度升高对土壤食物网的扰动,相对于低氮条件,高量氮肥的施用一方面能够通过对线虫群落环境的改变直接影响到线虫群落的数量和结构,另一方面,通过对植物生理、生长的影响而对线虫群落产生间接影响。因此, O_3 浓度升高条件下增施氮肥能够使食物网处于更稳定的状态。

4 结论

O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用显著改变了小麦成熟期土壤微生物生物量和水溶性有机碳的含量,小麦根生物量随着 O_3 浓度升高而降低。 O_3 浓度升高和不同氮肥施用水平的交互作用使土壤线虫群

落组成发生改变。与对照相比,线虫的成熟度指数和结构指数在低氮条件下随 O₃ 浓度升高而降低;而在高氮条件下随 O₃ 浓度升高而升高。表明增施氮肥能够缓解 O₃ 浓度升高对土壤食物网的扰动,相对于低氮处理,高氮处理使食物网处于更稳定的状态。

参考文献 (References):

- [1] 杨连新,王余龙,石广跃,王云霞,朱建国, Kobayash K, 赖上坤. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展. 应用生态学报, 2008, 19(4): 901-910.
- [2] Ashmore M R, Bell J N B. The role of ozone in global change. *Annals of Botany*, 1991, 67(S1): 39-48.
- [3] 朱新开,刘晓成,孙陶芳,郭文善,朱建国,冯兆中, Kobayashi K. FACE 条件下 O₃ 浓度增高对小麦产量和籽粒充实的影响. 中国农业科学, 2011, 44(6): 1100-1108.
- [4] 王曙光,冯兆忠,王效科,冯宗炜. 大气臭氧浓度升高对丛枝菌根(AM)及其功能的影响. 环境科学, 2006, 27(9): 1872-1877.
- [5] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [6] 李全胜,林先贵,胡君利,张晶,余永昌,沈标,朱建国. 近地层臭氧浓度升高对稻田土壤氨氧化和反硝化细菌活性的影响. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1789-1793.
- [7] 陈展,王效科,段晓男,冯兆忠,吴庆标. 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响. 生态学报, 2007, 27(5): 1803-1808.
- [8] 陈娟,曾青,朱建国,刘钢,曹际玲,谢祖彬,唐昊治, Kobayashi K. 施氮肥缓解臭氧对小麦光合作用和产量的影响. 植物生态学报, 2011, 35(5): 523-530.
- [9] Watanabe M, Yamaguchi M, Matsumura H, Kohno Y, Izuta T. Effects of ozone on the growth and photosynthesis of *Castanopsis sieboldii* seedlings grown under different nitrogen loads. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2008, 64(3): 143-155.
- [10] 罗克菊,朱建国,刘钢,唐昊治,李春华,曾青. 臭氧胁迫对水稻的光合损伤与施氮的缓解作用. 生态环境学报, 2012(3): 481-488.
- [11] 陈娟,曾青,朱建国,刘钢,谢祖彬,唐昊治, Kobayashi K. 臭氧和氮肥交互对小麦干物质生产、N、P、K 含量及累积量的影响. 生态环境学报, 2011, 20(4): 616-622.
- [12] Li Q, Bao X L, Lu C Y, Zhang X K, Zhu J G, Jiang Y, Liang W J. Soil microbial food web responses to free-air ozone enrichment can depend on the ozone-tolerance of wheat cultivars. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 27-35.
- [13] Ritz K, Trudgill D L. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils: perspectives and challenges. *Plant and Soil*, 1999, 212(1): 1-11.
- [14] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera—An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [15] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14-19.
- [16] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [17] Yeates G W, Tate K R, Newton P C D. Response of the fauna of a grassland soil to doubling of atmospheric carbon dioxide concentration. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(3): 307-315.
- [18] Yeates G W, Newton P C D, Ross D J. Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(5): 319-326.
- [19] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13-29.
- [20] Fuhrer J, Booker F. Ecological issues related to ozone: Agricultural issues. *Environment International*, 2003, 29(2/3): 141-154.
- [21] Kasurinen A, Gonzales P K, Riikonen J, Vapaavuori E, Holopainen T. Soil CO₂ efflux of two silver birch clones exposed to elevated CO₂ and O₃ levels during three growing seasons. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1654-1665.
- [22] Neher D A, Weicht T R, Moorhead D L, Sinsabaugh R L. Elevated CO₂ alters functional attributes of nematode communities in forest soils. *Functional Ecology*, 2004, 18(4): 584-591.
- [23] Loya W M, Pregitzer K S, Karberg N J, King J S, Giardina C P. Reduction of soil carbon formation by tropospheric ozone under increased carbon dioxide levels. *Nature*, 2003, 425(6959): 705-707.
- [24] Larson J L, Zak D R, Sinsabaugh R L. Extracellular enzyme activity beneath temperate trees growing under elevated carbon dioxide and ozone. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1848-1856.
- [25] King J S, Pregitzer D Z, Sober J, Isebrands R, Dickson G, Hendrey D. Fine-root biomass and fluxes of carbon in young stands of paper birch and trembling aspen as affected by elevated atmospheric CO₂ and tropospheric O₃. *Oecologia*, 2001, 128(2): 237-250.
- [26] Yeates G W. Effect of plants on nematode community structure. *Annual Review of Phytopathology*, 1999, 37: 127-149.
- [27] 石春红,郑有飞,吴芳芳,刘宏举,赵泽,胡程达. 大气中臭氧浓度增加对根际和非根际土壤微生物的影响. 土壤学报, 2009, 46(5): 894-898.
- [28] De Deyn G B, Raaijmakers C E, van Ruijven J, Berendse F, van der Putten W H. Plant species identity and diversity effects on different trophic levels of nematodes in the soil food web. *Oikos*, 2004, 106(3): 576-586.
- [29] Meehan T D, Crossley M S, Lindroth R L. Impacts of elevated CO₂ and O₃ on aspen leaf litter chemistry and earthworm and springtail productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(7): 1132-1137.