

地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放的影响

胡正华^{1,3}, 蒋静艳¹, 牛传坡¹, 孙文娟², 黄耀^{1,2*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 南京信息工程大学环境科学系, 南京 210044)

摘要:通过室外盆栽实验,用静态箱-气相色谱法测定土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 排放通量,研究了 UV-B 辐射增强 20% 对土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 排放的影响.结果表明,相同的气象条件和田间管理下,UV-B 辐射增强处理对呼吸速率和 N_2O 排放的季节变化模式无明显影响.在返青期,UV-B 辐射增强显著降低了土壤-冬小麦系统的呼吸速率,但对 N_2O 的排放通量没有产生显著影响;在拔节孕穗期,UV-B 辐射增强处理显著降低了土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 的排放通量;在抽穗-成熟期,UV-B 辐射增强处理对土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 的排放没有显著影响.返青-齐穗期,UV-B 增强处理显著降低土壤-冬小麦系统的 N_2O 累积排放量;但从齐穗开始至小麦成熟,UV-B 增强处理对土壤-冬小麦系统的 N_2O 累积排放量没有显著影响.

关键词:UV-B 辐射;土壤-冬小麦系统;呼吸速率; N_2O 排放

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2007)03-0449-06

Influence of Enhanced UV-B Radiation on Respiration Rate and N_2O Emission from Soil-Winter Wheat System

HU Zheng-hua^{1,3}, JIANG Jing-yan¹, NIU Chuan-po¹, SUN Wen-juan², HUANG Yao^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Department of Environmental Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the impact of enhanced UV-B radiation on respiration rate and N_2O emission from soil-winter wheat system, outdoor pot experiments with simulating 20% supplemental of UV-B were conducted, and static dark chamber-gas chromatograph method were used. Results indicated that the enhanced UV-B radiation did not change the seasonal pattern of respiration rate and N_2O emission. Enhanced UV-B radiation declined the rate of soil-winter wheat system's respiration but had no significant impact on N_2O emission in turning-green stage. While enhanced UV-B radiation declined both respiration rate and the N_2O emission in elongation-pregnant stage. From heading to maturity, the respiration rate and N_2O emission from soil-winter wheat system were not found to be significantly difference under UV-B radiation compared with ambient conditions. A further analysis suggested that enhanced UV-B radiation declined significantly cumulative amount of N_2O from soil-winter wheat system from wheat turning green to full heading stage, while no significant impact occurred from full heading to maturity.

Key words: UV-B radiation; soil-winter wheat ecosystem; respiration rate; N_2O emission

全球变暖和地表紫外辐射增强已成为当今重大的全球性环境问题,引起了各国政府和学术界的广泛关注.作为重要的温室气体, N_2O 的浓度在过去的 250 a 里,有着显著的增加,并且在未来的 100 a 里依然呈增加趋势^[1].由于大气中氯氟化烃(CFCS)、 N_2O 等含量显著升高,导致平流层臭氧浓度不断减少,大气臭氧层的破坏,使得到达地表的太阳紫外辐射比 1980 年前增加了 6%~14%^[2],且在今后的 40 a 内,其强度还将持续增强^[3].

大量研究表明 UV-B 辐射增强对农田生态系统产生重要的影响:使作物叶面积减少、植株矮化,光

合与蒸腾速率降低,抑制植株生长和干物质的积累,导致作物产量降低^[4~8].另外,对土壤微生物群落及活性也会产生影响^[9~12].土壤-作物系统的呼吸速率反映了该系统的生物活性,而农田是 N_2O 的重要排放源,农田 N_2O 的排放主要来自于土壤微生物的硝

收稿日期:2006-04-15;修订日期:2006-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029);中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题项目(LAPC-KF-2004-03);南京信息工程大学科研基金项目(Y410)

作者简介:胡正华(1973~),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为陆地生态系统碳氮循环与全球变化, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

化-反硝化过程,以及作物自身氮代谢过程的中间产物^[13,14],其研究主要集中于土壤水分、肥料施用、种植制度及植物类型等^[15~18].

关于 UV-B 辐射增强是否会通过影响作物生长和土壤微生物种类与活性进而影响农田生态系统呼吸速率和 N₂O 的排放鲜见报道.本研究通过人工模拟 UV-B 辐射增强条件,测定土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 的排放通量,探讨 UV-B 辐射增强是否影响土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N₂O 的排放,以期将来 UV-B 辐射增强情景下了解农田生态系统温室气体排放趋势提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 盆栽实验与田间管理

本研究采用室外盆栽实验,于 2004~2005 年冬小麦生长季在南京信息工程大学实验田进行,钵钵用紫砂泥烧制而成,钵高和内圆直径均为 20 cm 左右.钵钵上口有 1.5 cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封,钵钵底部有若干直径为 2 cm 的小孔以渗漏降水.为使钵钵的温度与大田土壤温度一致并减小钵钵间的温度差异,钵钵的 4/5 高度埋入土壤.供试土壤采自江苏省南京市郊区盘城镇,为潜育型水稻土,灰马肝土属,耕层土壤质地为壤质粘土,黏粒含量为 26.1%.土壤 pH(H₂O)值为 6.22,有机碳、全氮的含量分别为 19.4 g/kg、1.45 g/kg.冬小麦品种为扬麦 158,每盆定苗 10 株.冬小麦主要生育期与田间管理见表 1.

表 1 冬小麦主要生育期与肥料管理

Table 1 Developmental stages of winter wheat and fertilizer management	
日期	生育期与肥料管理
2004-11-19	播种, 每盆基肥施用量为: 尿素 1.29 g, KH ₂ PO ₄ 0.76 g, K ₂ SO ₄ 0.89 g
2004-11-30	出苗
2005-01-17	越冬肥, 每盆施用量为: 尿素 0.32 g, KH ₂ PO ₄ 0.19 g, K ₂ SO ₄ 0.22 g
2005-02-25	返青肥, 每盆施用量与 2005-01-17 相同
2005-03-23	拔节肥, 每盆施用量与 2005-01-17 相同
2005-04-22	齐穗
2005-05-31	收获

1.2 实验方法

1.2.1 UV-B 辐射增强处理

采用人为增加紫外辐射的方法,将 UV-B 灯管悬挂于作物上方,用于模拟 UV-B 辐射增强.所采用的 UV-B 灯管由上海华德电光源厂生产(40 W, 峰值 313 nm),大部分属 UV-B 光谱(280~320 nm),有少

量 UV-A 与 PAR(图 1).

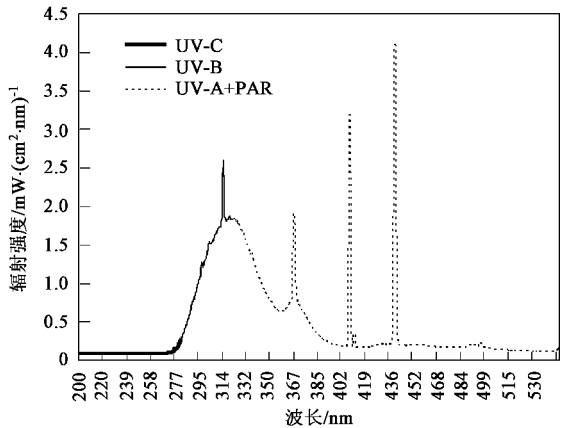


图 1 UV-B 灯管的光谱

Fig.1 Spectrum of UV-B lamps

试验设对照(CK)与处理(T). Albritton 等研究指出^[3],未来 40 a 内平流层臭氧总量减少 2%~10%,而臭氧每衰减 1%,到达地表紫外辐射将增加 2%.本研究将 UV-B 增强幅度设在 20%,即处理比对照的 UV-B 强度高 20%.处理与对照均悬挂 UV-B 灯管,但对照的灯管用 Mylar 膜(美国杜邦公司生产,厚度 125 μm)包裹,以滤掉 320 nm 以下的波段(图 2),保证处理与对照相比仅 UV-B 增强,而其它环境条件(自然光、少许 UV-A 和 PAR)相同.

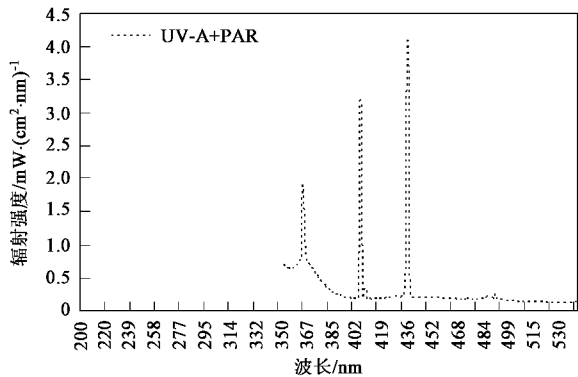


图 2 Mylar 膜过滤后的 UV-B 灯管光谱

Fig.2 Spectrum of UV-B lamps filtrated by Mylar films

UV-B 辐射增强处理从 2005-02-19 开始至收获止,每天处理时间为 08:00~16:00,阴雨天停止照射.UV-B 背景强度与灯管 UV-B 辐照强度测定采用紫外辐照计(北京师范大学生产,波长峰值 310 nm),每天分不同时段测定,计算其日均 UV-B 辐射量,然后调整灯管高度,使处理比对照的 UV-B 辐射日均增强 20%.

1.2.2 气样采集与分析

气体样品采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[19]. 气体采样箱为圆柱型, 用 PVC 材料制成, 高 1 m, 箱体直径与钵钵凹槽直径一致. 采样箱外侧先包有 1 层海绵, 然后覆盖 1 层铝箔以减少采样期间由于太阳辐射所引起的箱内温度变化. 每周采集气体样品 2 次, 采样时间为 09:30 ~ 11:00, 气样是用带有三通阀开关的针筒采集, 每钵钵采样 3 个, 分别于关箱后 0、10、20 min 采集, 每次抽样 50 mL. 同时记录箱内温度、土壤水分、土壤温度、植株株高、植株叶面积等. 所采集的气样用经改装过的 Agilent-4890D 气相色谱仪同步检测 CO₂ 和 N₂O 的浓度比.

2 结果与讨论

2.1 不同生育期 UV-B 辐射增加对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响

土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放通量的季节性变化见图 3 和图 4. 图 3 和图 4 表明在小麦生长的前期(返青期), 其呼吸速率和 N₂O 的排放通量较低, 随着植物的生长和气温的升高, 其呼吸速率和 N₂O 的排放通量也逐渐增大, 在抽穗期出现峰值, 到快成熟收获时又逐渐降低. UV-B 增强处理基本上未改变土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放通量的季节性变化规律.

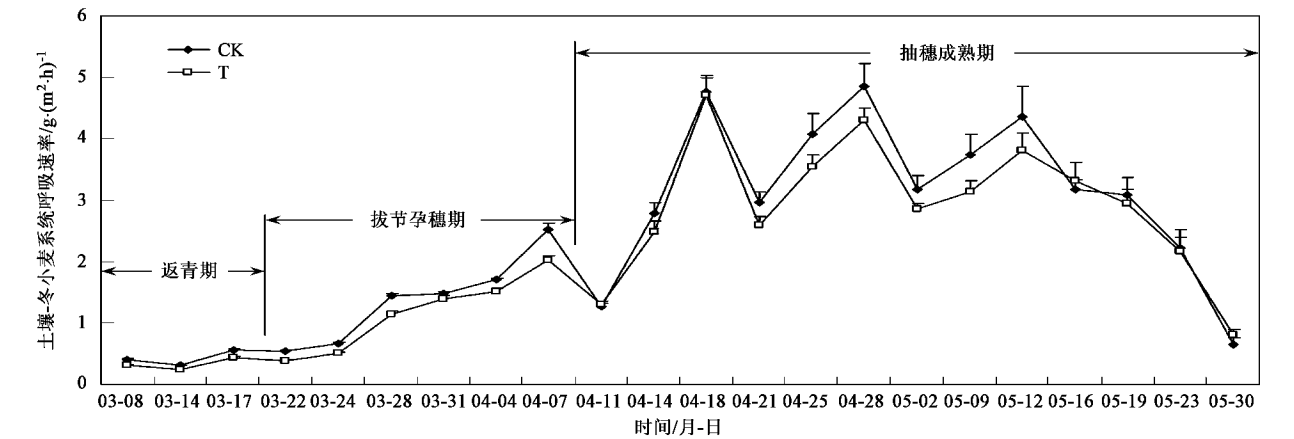


图 3 土壤-冬小麦系统呼吸速率
Fig.3 Respiration rate of soil-winter wheat system

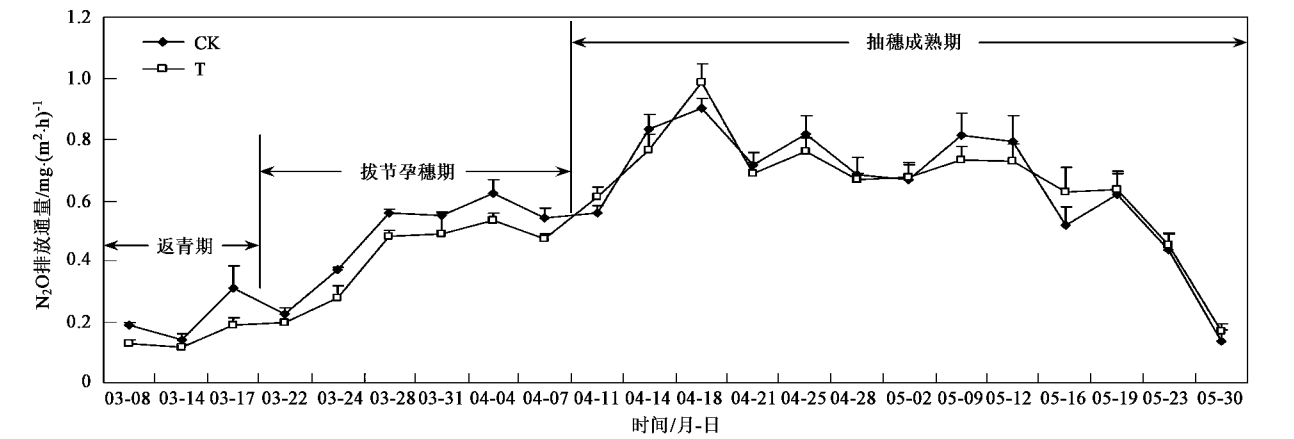


图 4 土壤-冬小麦系统 N₂O 排放通量
Fig.4 N₂O emission from soil-winter wheat system

2.1.1 返青期 UV-B 辐射增加对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响

在小麦返青期, 3 次采样对照组的呼吸速率都

高于处理组(图 3). 方差分析结果表明, 呼吸速率差异明显(p 值分别为 0.007, 0.012, 0.002). 但处理组 and 对照组 N₂O 排放通量的变化规律与呼吸速率不

一致,表现为 03-08 对照组的 N_2O 排放通量大于处理组($p = 0.005$),而 03-14 和 03-17 处理组的 N_2O 排放通量与对照组的没有明显差异(p 值分别为 0.337,0.134).

03-08 是冬小麦幼苗生长的早期阶段,温度较低,作物生长缓慢,植株幼小, N_2O 的释放量较小.此时土壤-冬小麦系统内 N_2O 的排放主要来源于土壤微生物硝化和反硝化过程.因小麦地上部分生物量很小,覆盖度低,UV-B 直接辐照到土壤上,可能会影响到表层土壤中 N_2O 的产生,这或许是 03-08 N_2O 排放出现显著差异的原因.但因未设裸土处理,故上述解释有待进一步实验验证.随着冬小麦的进一步

生长,其对土壤的覆盖度增加,03-14 采样分析时 N_2O 排放的显著性差异已经消失.03-14 进行了收割采样实验(表 2),UV-B 辐射增强对小麦的根干重、地上部分干重及其总生物量影响不显著(p 值分别为 0.693,0.822,0.727).可能是 UV-B 增加处理时间较短(02-19~03-14 有效辐射时间共 20 d),其对植株的影响尚未在返青期的生物量上反映出来.UV-B 辐射对土壤的穿透能力通常不超过 5 mm^[20],UV-B 增加对土壤微生物种类及数量的影响主要是通过影响小麦生长生理代谢过程而产生的间接影响^[21],所以在处理与对照植株生物量几乎没有差别的情况下,土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量表现为没有差异.

表 2 地表 UV-B 辐射增强对小麦生物量的影响¹⁾
Table 2 Effects of enhanced UV-B on dry matter yield of winter wheat

项目	返青期		拔节孕穗期		成熟期	
	CK	T	CK	T	CK	T
根干重/g	0.57±0.14	0.66±0.34	8.49±2.90	5.49±1.06	6.17±1.23	4.68±0.62
地上部分干重/g	1.51±0.32	1.57±0.22	18.23±1.94	13.70±1.67*	50.71±7.61	42.54±7.08
总生物量/g	2.08±0.36	2.22±0.56	26.71±4.38	19.18±2.70	56.88±8.75	47.22±6.91

1) CK、T 分别代表对照与处理,所有数值为均值±标准差; * 表示处理与对照在 0.05 水平上有显著差异($n = 3$)

虽然返青期对照与处理的小麦植株在生物量上尚无差异,但此时 UV-B 已经开始对小麦植株的某些生理特征产生影响,相关研究表明^[7, 22],UV-B 增加会增大叶片气孔阻力,降低气孔导度,降低蒸腾速率;另外,UV-B 辐射可能影响了表层土壤的呼吸速率,所以在土壤-冬小麦系统的呼吸速率上对照与处理表现出了较大的差异.

2.1.2 拔节孕穗期 UV-B 辐射增加对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放的影响

由图 3 可见,在拔节孕穗期对照组呼吸速率高于处理组,对平均呼吸速率进行方差分析,对照与处理的差异极显著($p = 0.001$),处理组的呼吸速率仅为对照的 83.6%.土壤-冬小麦系统的 N_2O 排放通量见图 4,将对照与处理的 N_2O 平均排放速率进行方差分析,结果表明差异显著($p = 0.015$),UV-B 增强处理使 N_2O 平均排放通量降低了 16.4%.

UV-B 辐射增强可能主要通过影响作物的生长而影响到土壤-植物系统呼吸速率和 N_2O 的排放.冬小麦拔节孕穗期是对 UV-B 辐射最为敏感的生长阶段^[23],受 UV-B 胁迫小麦的光合与呼吸速率降低,气孔阻力增大,蒸腾速率降低,有机物质积累受阻,生物量降低^[7],整个系统的呼吸速率也降低.04-07 进行了 1 次收割性实验,结果表明,UV-B 增强处理降

低了小麦的生物量(表 2).本次收割实验虽然根干重差异不显著($p = 0.167$),但冬小麦地上部分干重差异显著($p = 0.037$),UV-B 增强处理使地上部分干重减少了 24.85%.同时观测到 UV-B 增强处理降低了植株分蘖数,且差异显著($p = 0.021$).

由于作物不仅是农田 N_2O 排放的主要通道,而且自身也可产生并排放 N_2O ^[14, 24],UV-B 辐射增强对 N_2O 的影响机理主要表现在对小麦植株 N 代谢过程的影响,可能是 UV-B 影响了小麦叶片硝酸还原酶的活性,从而使得叶片中 NO_3^- -N 的转化过程改变, NO_3^- -N 大部分经同化还原成 NH_3 并进一步合成氨基酸,而异化还原生成的 N_2O 量降低,系统排放量也随之降低^[21].

2.1.3 抽穗-成熟期 UV-B 辐射增加对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放的影响

抽穗-成熟期土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 的排放通量见图 3 和图 4.将对照与处理的平均呼吸速率和 N_2O 平均排放通量分别进行方差分析, p 值分别为 0.385 和 0.955,说明对照与处理的呼吸速率和 N_2O 的排放量没有显著差异.有研究表明 UV-B 强度较高的季节里冬小麦对 UV-B 增加的敏感性较低^[23],4 月份以后南京地区 UV-B 强度已经较高,

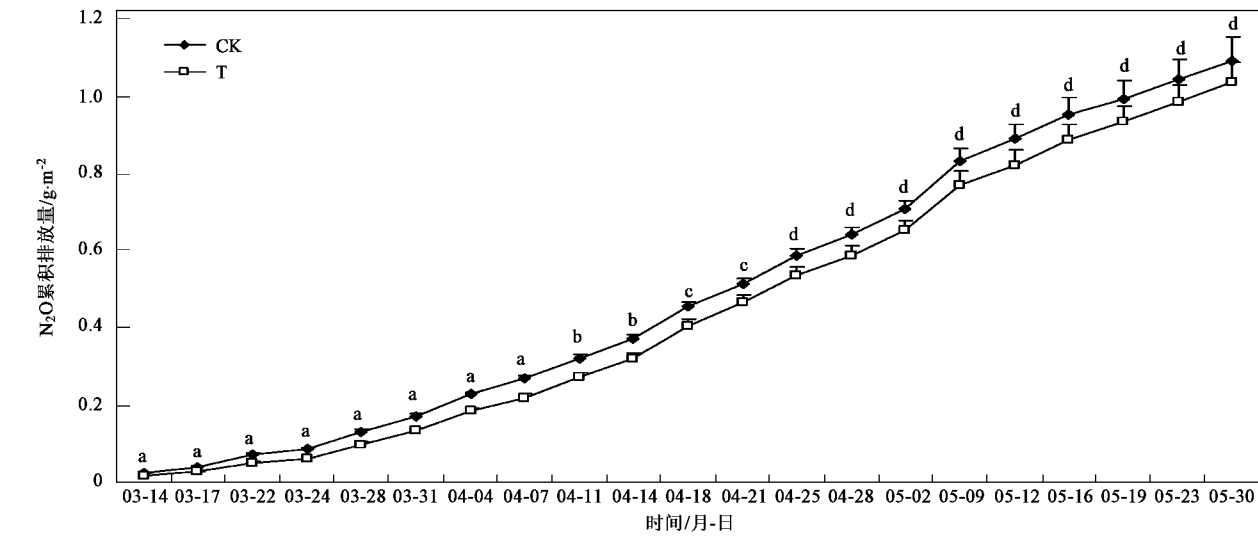
但对冬小麦的伤害却逐渐降低,加之植物具有一定的自我修复能力,所以处理与对照相比植株的生长状况没有明显的差别,与植物生长状况关系密切的呼吸速率和 N₂O 排放速率也没有出现显著差异.

有研究表明 UV-B 增强处理使冬小麦的生物量降低^[8],但本研究在抽穗-成熟期生物量没有出现明显的变化.05-31 收割成熟植株并进行常规考种(表 2),UV-B 辐射增强对小麦的根干重、地上部分干重及总生物量影响不显著(p 值分别为 0.075, 0.167, 0.134).这可能与供试小麦品种有关,陈建军等曾对 20 个小麦品种进行 UV-B 辐射增强处理,结果发现有些品种叶面积指数、株高、节间长等显著降低,而有些

品种这些指标却增加,另有些品种未受影响^[25].

2.2 返青期至成熟期系统 N₂O 累积排放量的比较

将处理与对照的 N₂O 累积排放量(从返青期至成熟期)进行比较(图 5),方差分析表明,从返青期至齐穗(03-14 ~ 04-21),UV-B 增强处理都显著降低了土壤-冬小麦系统 N₂O 累积排放量.但从 04-25 开始直至小麦成熟,UV-B 增强处理对系统的 N₂O 累积排放量没有显著影响.其原因可能是小麦返青期-齐穗对 UV-B 辐射敏感,而齐穗-成熟期对 UV-B 辐射不敏感^[23],在齐穗-成熟期对照与处理的 N₂O 排放通量都较高,且在整个生育期 N₂O 累积排放量中占较大比例,导致冬小麦齐穗-成熟期对照与处理的



图中 a, b, c, d 代表对照与处理的方差分析结果,其中: a 表示 $p < 0.01$, b 表示 $0.01 < p < 0.05$, c 表示 $0.05 < p < 0.1$, d 表示 $p > 0.1$

图 5 返青至成熟期 N₂O 累积排放量

Fig.5 Cumulative amount of N₂O from soil-winter wheat system from turning-green to maturity stage

N₂O 累积排放量没有出现显著差异.

3 结论

- (1)UV-B 辐射增强处理对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放通量的季节性变化规律无明显影响.
- (2)在不同生育期,UV-B 辐射增强处理对土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N₂O 的排放通量影响不同.在返青期,UV-B 增强处理显著降低了土壤-冬小麦系统的呼吸速率,但对 N₂O 的排放通量并没有产生显著影响;在拔节孕穗期,UV-B 增强处理显著降低了土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N₂O 的排放通量;在抽穗-成熟期,UV-B 增强处理对土壤-冬小麦

- 系统的呼吸速率和 N₂O 的排放都没有显著影响.
- (3)在返青-齐穗期,UV-B 增强处理显著降低了土壤-冬小麦系统的 N₂O 累积排放量;但从小麦齐穗开始,UV-B 增强处理对土壤-冬小麦系统的 N₂O 累积排放量没有显著影响.
- 参考文献:
- [1] IPCC. Climate Change 2001. (http://www.ipcc.ch/).
- [2] UNEP/WMO. Executive Summary, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No.47 [R]. UNEP/WMO, 2002.
- [3] Albritton D L, Watson R J. Scientific Assessment of stratospheric ozone change: 1989, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 20 [R]. WMO, 1990.

- [4] Mark U, Saile-Mark, Tevini M. Effects of solar UV-B radiation on the growth, flowering and yield of Central and Southern European maize cultivars [J]. Photochem. Photobiol., 1996, **64**(30): 457 ~ 462.
- [5] Reddy K R, Kakani V G, Zhao D, *et al.* Cotton responses to ultraviolet-B radiation: experimentation and algorithm development [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, **120**: 249 ~ 266.
- [6] Zhao D, Reddy K R, Kakani V G, *et al.* Growth and physiological responses of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to elevated carbon dioxide and ultraviolet-B radiation under controlled environmental conditions [J]. Plant, Cell and Environment, 2003, **26**: 771 ~ 782.
- [7] Kakani V G, Reddy K R, Zhao D, *et al.* Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, **120**: 191 ~ 218.
- [8] Zheng Y, Gao W, Loser J R, *et al.* Yield and yield formation of field winter wheat in response to supplemental solar ultraviolet-B radiation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, **120**: 279 ~ 283.
- [9] 李元, 杨济龙, 王勋陵. 紫外辐射增加对春小麦根际土壤微生物种群数量的影响[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(2): 157 ~ 160.
- [10] Searles P S, Kropp B R, Flint S D, *et al.* Influence of solar UV-B radiation on peatland microbial communities of southern Argentina [J]. New Phytologist, 2001, **152**: 213 ~ 221.
- [11] Johnson D, Campbell C D, Lee J A, *et al.* Arctic microorganisms respond more to elevated UV-B radiation than CO₂ [J]. Nature, 2002, **416**: 82 ~ 83.
- [12] Johnson D, Campbell C D, Lee J A, *et al.* Nitrogen storage (communication arising): UV-B radiation and soil microbial communities [J]. Nature, 2003, **423**: 137 ~ 138.
- [13] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, *et al.* Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, **10**(3): 401 ~ 412.
- [14] 陈冠雄, 徐慧, 张颖, 等. 植物——大气 N₂O 的一个潜在排放源[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(5): 504 ~ 511.
- [15] 郑循华, 王明星, 王跃思. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, **7**(3): 273 ~ 279.
- [16] Maggiorotto S R, Webb J A, Wagner-Riddle C, *et al.* Nitrous and nitrogen oxide emission from turfgrass receiving different forms of nitrogen fertilizer [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**: 621 ~ 630.
- [17] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emission from intensive agricultural systems: Variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, **104**(D21): 26891 ~ 26899.
- [18] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 中国农业科学, 2002, **35**(9): 1104 ~ 1108.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-time ecosystem [J]. Advance of Atmospheric Science, 2003, **20**(5): 842 ~ 844.
- [20] Moorhead D L, Callaghan T V. Effects of increasing UV-B radiation on decomposition and soil organic matter dynamics: a synthesis and modeling study [J]. Biology and Fertility of Soils, 1994, **18**: 19 ~ 26.
- [21] 蒋静艳, 牛传坡, 胡正华, 等. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N₂O 排放的影响机理研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1712 ~ 1716.
- [22] 李元, 王勋陵. 紫外辐射增加对春小麦生理、产量和品质的影响[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(5): 504 ~ 509.
- [23] 王传海, 郑有飞, 陈敏东, 等. 小麦不同生育期对 UV-B 敏感差异性比较[J]. 生态环境, 2004, **13**(4): 483 ~ 486.
- [24] Smart D R, Bloom A J. Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, **98**(14): 7875 ~ 7878.
- [25] 陈建军, 祖艳群, 陈海燕, 等. 20 个小麦品种对 UV-B 辐射增强响应的形态学差异[J]. 农村生态环境, 2001, **17**(2): 26 ~ 29.