

UV-A 辐射对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响

胡正华^{1,3}, 蒋静艳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, 江苏 南京 210095; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 南京信息工程大学生态学系, 江苏 南京 210044)

摘要: 为研究 UV-A 辐射增强对土壤-冬小麦系统微量气体释放的影响规律, 通过室外盆栽试验, 人工模拟 UV-A 辐射增强, UV-A 辐射强度处理分别比自然光(CK)增加 10%(T1)和 20%(T2)。采用静态箱-气相色谱法测定了不同 UV-A 辐射强度下裸土、土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N₂O 排放通量。结果表明: T1 和 T2 处理下裸土呼吸速率分别比 CK 高 83%($P=0.022$)和 263%($P=0.038$), T2 处理比 T1 高 99% ($P=0.073$); T1 和 T2 处理使裸土 N₂O 排放通量比 CK 分别增加了 64% ($P=0.019$)和 186% ($P=0.059$), 但 T2 与 T1 处理间的 N₂O 排放通量差异不显著($P=0.123$)。UV-A 辐射增强没有显著影响土壤-冬小麦系统的呼吸速率大小; T2 处理下土壤-冬小麦系统的 N₂O 排放通量显著高于 CK ($P=0.012$)和 T1 ($P=0.010$), 分别比 CK 和 T1 高 33%和 40%, 但 T1 和 CK 的 N₂O 排放通量无显著差异($P=0.352$)。UV-A 辐射增强没有影响冬小麦生物量($P>0.05$), 但 T2 处理下土壤-冬小麦系统的土壤微生物碳和亚硝酸氧化菌的数量明显高于对照。

关键词: UV-A 辐射; 土壤-冬小麦系统; 裸土; 呼吸速率; N₂O 排放通量

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)05-1860-06

Influence of UV-A Radiation on Respiration Rate and N₂O Emission in Soil-Winter Wheat System

HU Zheng-hua^{1,3}, JIANG Jing-yan¹, 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 Ecology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Extensive work has been done to understand the effect of enhanced UV-B (280~320 nm) radiation because of the depletion of the stratospheric ozone layer on plants, however, the available information related to the effect of UV-A (320~400 nm) on plants or ecosystem is limited. It merits further studies due to the facts that UV-A constitutes a major portion of the solar radiation and passes through the stratospheric ozone layer almost unattenuated. To investigate the impact of enhanced UV-A radiation on trace gases emission from bare soil and soil-winter wheat system, outdoor pot experiments with simulating 0%(CK), 10% (T1) and 20% (T2) supplement of UV-A were conducted, and static dark chamber-gas chromatograph method were used to measure respiration rate and N₂O emission fluxes. Results indicated that enhanced UV-A radiation increased respiration rate and N₂O emission fluxes in bare soil, soil respiration rates of T1 and T2 were 1.83 and 3.63 times larger than those of CK ($P=0.022$, 0.038, respectively), and soil respiration rates of T2 were 1.99 times larger than those of T1 ($P=0.073$). N₂O emission fluxes in bare soil of T1 and T2 were 1.64 and 2.86 times larger than that of CK ($P=0.019$, 0.059, respectively), while there no significant difference between T2 fluxes and T1 fluxes ($P=0.123$). Enhanced UV-A radiation had no significant impact on respiration rate of soil-winter wheat system, but 20% supplemental UV-A radiation increased significantly N₂O emission fluxes from soil-winter wheat system, N₂O emission fluxes of T2 were 1.33 and 1.40 times larger than those of CK ($P=0.012$) and T1 ($P=0.010$), while T1 and CK had no significant difference in N₂O emission fluxes ($P=0.352$). In addition, enhanced UV-A radiation had no significant impact on biomass of winter-wheat ($P>0.05$), but soil microbial biomass C and nitrite-oxidation bacteria quantity of T2 were obviously higher than those of CK.

Keywords: UV-A radiation; soil-winter wheat system; bare soil; respiration rate; N₂O fluxes

收稿日期: 2007-06-01

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(LAPC-KF-2004-03)

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

大气痕量气体氧化亚氮(N₂O)是重要的温室气体,其单分子百年尺度增温潜势为 CO₂ 分子的 296 倍^[1],并且参与平流层许多光化学反应,间接破坏臭氧层^[2,3]。农田生态系统是 N₂O 的重要排放源,约占人为源的 45%^[4]。CO₂ 是最重要的温室气体,在 20 世纪 90 年代以来大气中 CO₂ 以(3.2±0.1)Pg·a⁻¹ 的年平均速率增加^[5]。

紫外辐射是太阳辐射中的一个波段,虽然其能量占太阳辐射比例小,但其对生态系统独特的作用已引起人们的关注。紫外辐射依其波长分为三部分:UV-A (320~400 nm)、UV-B (280~320 nm)及 UV-C (200~280 nm)。UV-A 对 UV-B 的生物学效应有减缓作用^[6-8],缺少 UV-A 将导致 UV-B 效应的放大^[9]。受太阳高度角、云量、大气透明度等的影响,地表 UV-A 辐射具有明显的日变化和季节变化特征^[10-12],且空间分布亦存在显著的差异^[13]。现有的研究主要集中在 UV-B 的生态作用方面^[14-17],有关 UV-A 的研究多集中在对人类健康的影响上^[18-21],而对植物或农田生态系统的影响方面仅有部分研究报道:UV-A 辐射降低了部分植物的地上部分生物量,并使植物的株高与叶面积显著降低^[22,23],影响植物生长和形态学特征^[9]。Niemi 等研究发现 UV-A 辐射增加了湿地植物 *Sphagnum angustifolium* 的叶绿素和类胡萝卜素含量,促进了植物光合作用和 CO₂ 交换通量^[24]。

UV-A 辐射对土壤、土壤-作物系统有何影响?其是否会影响到农田生态系统的呼吸速率和 N₂O 的排放鲜有报道。本研究采用室外盆栽试验,应用不同强度 UV-A 辐射对裸土和冬小麦进行处理,并测定呼吸速率和 N₂O 排放通量,探讨 UV-A 辐射对麦田生态系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 室外盆栽

本试验采用室外盆栽方法^[25],设裸土(没有任何植物生长)、冬小麦两类实验,于 2003-2004 年冬小麦生长季在南京信息工程大学试验田进行。供试冬小麦品种为扬麦 158,大田播种出苗后移栽,每盆定苗 8 株。盆钵为紫砂泥烧制而成,内圆直径 20 cm 左右,盆钵上口有 1.5 cm 深的凹型槽以采样时注水与采样箱密封,盆钵底部有若干直径为 2 cm 的小孔以渗漏漏水。为使盆钵土壤的温度与大田温度一致并减小盆钵间的温度差异,盆钵的 4/5 高度埋入土壤。采集气体时将圆筒型采样箱套在盆钵凹型槽内,将水注入凹槽加以密封。供试土壤采自南京市郊盘城镇,混拌均匀装盆。冬小麦主要生育期与肥料管理见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 UV-A 辐射处理

UV-A 辐射处理从 2004-02-27 开始至收获止。试验设对照(CK,自然光 UV-A 强度)、处理 1(T1, UV-A 强度增加 10%)和处理 2(T2, UV-A 强度增加 20%)3 种辐射强度,各处理分别重复 4 次(土壤-冬小麦系统)和重复 2 次(裸土,没有植物生长,重复之间的变异较小)。人工模拟 UV-A 辐射增加:用可升降式灯架将 UV-A 灯管(上海华德光电源厂,40W,峰值 339 nm)悬挂于植株正上方,灯管主要光谱为 UV-A 波段(图 1),对照组上方相同高度处悬挂没有灯管的灯罩。每天开灯照射时间为 08:00—16:00,阴雨天停止照射。用 UVM-5056 型紫外辐照计(测量范围 250~400 nm, Apogee Instruments, Inc. USA)测定 UV-A 辐照强度。盆钵按东西方向排列以减少灯罩阴影。

1.2.2 气样采集与分析

裸土和土壤-冬小麦系统的呼吸作用通过测定 CO₂ 的排放来确定,气样采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[26]。采样箱为圆筒型,用 PVC 材料制成,高 1 m,箱体直径与盆钵凹槽直径一致。箱体外侧包有一层海绵,然后覆盖一层铝箔以减小采样时因太阳辐射

表 1 冬小麦主要生育期与肥料管理

Table 1 Growing stages of winter wheat and fertilizer management

日期	冬小麦生育期与肥料管理
2003-12-11	播种
2003-12-23	出苗
2004-01-06	移栽,每盆底肥施用量为:尿素 1.29 g, KH ₂ PO ₄ 0.76 g, K ₂ SO ₄ 0.89 g
2004-02-17	返青肥,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
2004-03-26	拔节肥,施用量与 2004-02-17 相同
2004-04-12	抽穗
2004-04-28	齐穗扬花
2004-06-01	收获考种

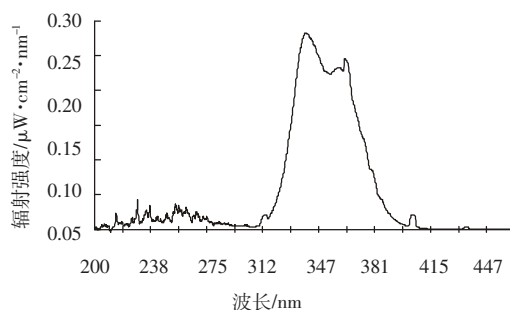


图 1 UV-A 灯管的光谱

Figure 1 The spectrum of UV-A lamps

所引起的箱内温度变化。采样时间为 09:30–11:00, 气样用带有三通阀开关的塑料针筒采集, 各盆钵每次采样 3 个, 时间间隔为 10 min, 分别于关箱后 0、10、20 min 采集, 样品量为 50 mL。同时记录箱内温度、土壤水分、土壤温度。所采气样用经改装的 Agilent-4890D 气相色谱仪同步检测 CO₂ 和 N₂O 的混合比。通过对每组 3 个样品的 CO₂ 和 N₂O 混合浓度与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行直线回归, 可求得该采样点目标气体的排放速率。继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、目标气体分子量等, 求得单位面积的排放量。温室气体排放通量的计算方法如下:

假定采样箱横截面积为 A , 有效高度为 H , 则箱内空气体积 $V=AH$ 。采样箱的有效高为地表至箱顶的高度。温室气体的排放通量 F 为:

$$F = \rho V \frac{dC}{dt} \frac{1}{A} = \frac{mP}{R(273+T)} \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} = H \frac{mP}{R(273+T)} \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

以 CO₂ 为例, 式中, ρ 为 CO₂ 的密度(g·L⁻¹), m 为 CO₂ 的摩尔质量(g·mol⁻¹), R 为普适气体常数(8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹), T 为采样时箱内平均气温(°C)。 P 为采样点大气压力, 通常视为标准大气压, 即 $P=1.013 \times 10^5$ Pa。由于气压随海拔高度而变, 因此对于高海拔区需将实际气压代入上式。把有关常数代入式(1)中, 经整理可得到温室气体的排放通量 F 的计算式为:

$$F = 60H \frac{44 \times 1.013}{8.314 \times (273+T)} \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

式(2)中, F 为温室气体的排放通量(mg·m⁻²·h⁻¹), dC/dt 为温室气体释放速率(μL·L⁻¹·min⁻¹ 或 ppmV·min⁻¹)。若排放速率 dC/dt 的单位为 nL·L⁻¹·min⁻¹ 或 ppbV·min⁻¹, 则排放通量的单位为 μg·m⁻²·h⁻¹。常数 60 为时间换算, 从分转换为小时。 H 为采样箱的有效高度(cm), T 为采样时箱内平均气温(°C), 常数 44 为 CO₂

的摩尔质量(g·mol⁻¹)。

1.2.3 相关项目的测定方法

土壤水分用 MPM-160 水分计测定, 与产 N₂O 相关的根际土壤亚硝酸氧化菌采用 MPN 法测定, 土壤微生物 C 或 N 的测定采用氯仿熏蒸-直接浸提法。收割试验收获的植株, 在 105 °C 杀青, 70 °C 烘干至恒重后, 测定生物量; 收获时, 对各处理植株进行常规考种。

1.2.4 统计分析

本研究中的数据统计分析, 应用统计软件 SPSS 10.0(SPSS Inc. 2000)和 Excel 完成。

2 结果与讨论

2.1 UV-A 辐射对裸土呼吸速率和 N₂O 排放的影响

裸土呼吸速率的季节变化规律见图 2a。从 3 月至 6 月, 呼吸速率呈一定的增加趋势, CK 与 T1 的增加幅度相对较小, T2 的增加幅度最大。CK、T1 和 T2 的平均呼吸速率分别为 75.4、138 和 274 mg·m⁻²·h⁻¹, T2 与 T1 处理显著高于 CK($P=0.038$ 和 0.022), T2 也比 T1 高($P=0.073$)。UV-A 辐射促进了裸土的呼吸作用, 且辐射强度越高效应越明显。

图 2b 为 CO₂ 累积排放量, Duncan 方差分析表明, T1 和 T2 的 CO₂ 排放量都显著大于 CK, T1 和 T2 处理下裸土 CO₂ 累积排放量分别比 CK 高 83%($P=0.022$) 和 263%($P=0.038$), T2 处理比 T1 高 99%($P=0.073$), UV-A 辐射增强处理增加了裸土的 CO₂ 累积排放量。

UV-A 辐射增强对裸土 N₂O 排放通量的影响见图 3a, 三者的季节变化没有明显的一致性。CK、T1 与 T2 处理的 N₂O 平均排放通量分别为 59.7 μg·m⁻²·h⁻¹、97.8 μg·m⁻²·h⁻¹ 和 171 μg·m⁻²·h⁻¹, T1 与 T2 处理显著

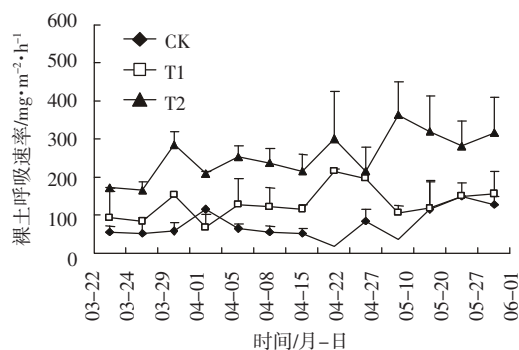


图 2a UV-A 辐射增强对裸土呼吸速率的影响

Figure 2a Effects of enhanced UV-A radiation on respiration rates in bare soil

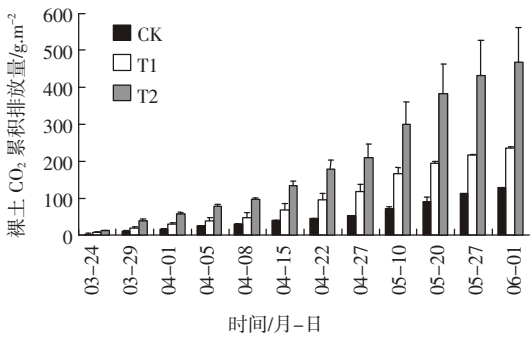


图 2b UV-A 辐射增强对裸土 CO₂ 累积排放量的影响
Figure 2b Effects of enhanced UV-A radiation on cumulative amount of CO₂ from bare soil

大于 CK($P=0.019$ 和 0.059),但 T1 与 T2 处理之间没有明显差异 ($P=0.123$)。裸土 N₂O 累积排放量见图 3b,T1 和 T2 处理的 N₂O 累积排放量分别比 CK 增加了 64%($P=0.019$)和 186%($P=0.059$),但 T2 与 T1 处理间的累积排放量差异不明显($P=0.123$)。可见,UV-A 辐射增强促进了裸土的 N₂O 排放。

2.2 UV-A 辐射对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响

图 4a 为不同 UV-A 辐射强度处理的土壤-冬小

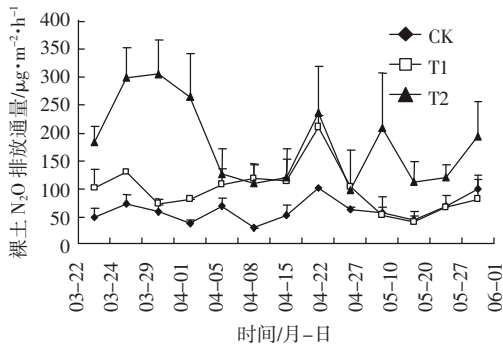


图 3a UV-A 辐射增强对裸土 N₂O 排放通量的影响
Figure 3a Effects of enhanced UV-A radiation on N₂O emission fluxes from bare soil

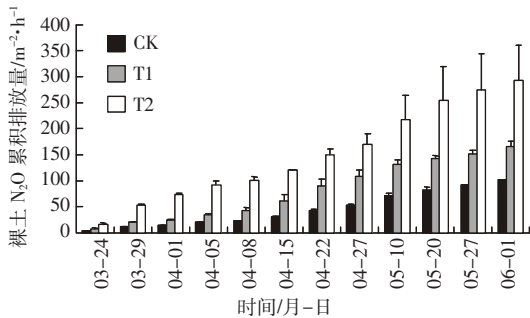


图 3b UV-A 辐射增强对裸土 N₂O 累积排放量的影响
Figure 3b Effects of enhanced UV-A radiation on cumulative amount of N₂O from bare soil

麦系统的呼吸速率。CK、T1 和 T2 的呼吸速率的季节变化特征相同,在返青期,植株幼小,呼吸速率较低,随着植株生长和气温上升,呼吸速率逐渐增大。CK、T1 和 T2 的平均呼吸速率大小分别为 951、892 和 867 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,三者之间没有显著差异($P>0.10$)。土壤—冬小麦系统的 CO₂ 累积排放量见图 4b,Duncan 分析表明,T2 和 T1 的 CO₂ 累积排放量与 CK 相比没有显著差异($P=0.425$ 和 0.169),同时 T2 与 T1 处理间差异也不明显($P=0.747$)。UV-A 增强处理没有显著影响土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 CO₂ 累积排放量。

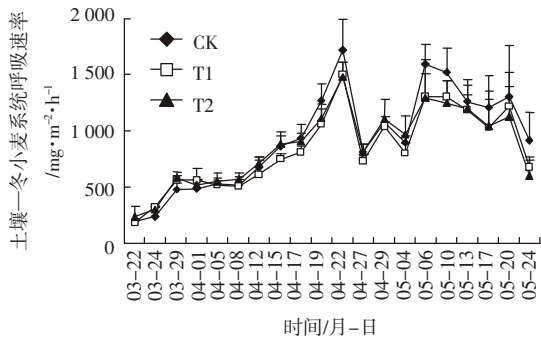


图 4a UV-A 辐射增强对土壤-冬小麦系统呼吸速率的影响
Figure 4a Effects of enhanced UV-A radiation on respiration rates in soil-winter wheat system

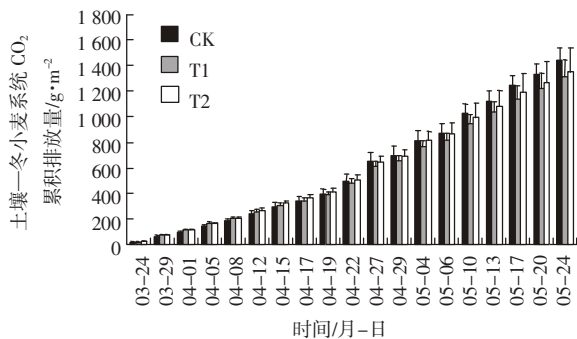


图 4b UV-A 辐射增强对土壤-冬小麦系统 CO₂ 累积排放量的影响
Figure 4b Effects of enhanced UV-A radiation on cumulative amount of CO₂ from soil-winter wheat system

土壤—冬小麦系统的 N₂O 排放通量见图 5a,N₂O 排放通量随着植株生长和气温上升而逐渐增大,至植株成熟时又降低,其季节变化特征基本相同。CK、T1 与 T2 的 N₂O 平均排放通量分别为 167、159 和 223 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,T1 与 CK 无明显差异($P=0.352$),而 T2 显著高于 CK($P=0.012$)和 T1($P=0.010$)。土壤-冬小麦系统 N₂O 的累积排放量见图 5b,T2 的 N₂O 累积排放

量分别比 CK 和 T1 高 33% ($P=0.012$) 和 40% ($P=0.010$), 但 T1 和 CK 的 N₂O 累积排放量无显著差异 ($P=0.352$)。

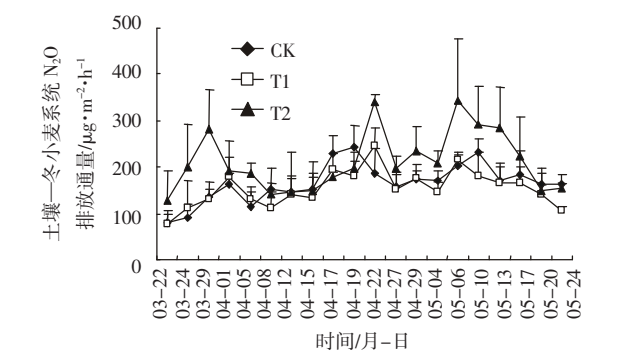


图 5a UV-A 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N₂O 排放通量的影响

Figure 5a Effects of enhanced UV-A radiation on N₂O emission fluxes from soil-winter wheat system

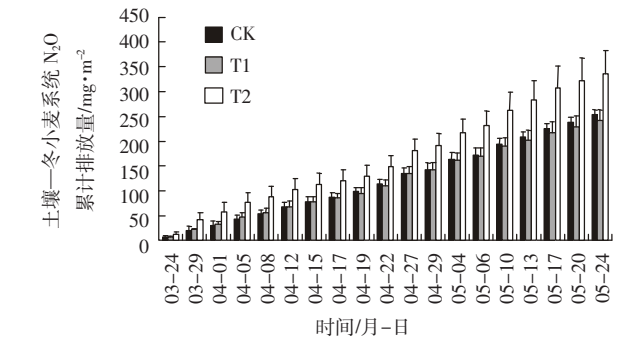


图 5b UV-A 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N₂O 累积排放量的影响

Figure 5b Effects of enhanced UV-A radiation on cumulative amount of N₂O from soil-winter wheat system

2.3 UV-A 辐射对冬小麦生物量及土壤微生物的影响

图 6a 是抽穗期 (2004-04-17) 收割植株的生物量。在根生物量、地上部分生物量和总生物量 3 项指标中,T1、T2 与 CK 均没有显著影响 ($P>0.05$), 但 T2 的根生物量显著小于 T1 ($P=0.011$)。图 6b 是成熟收获的植株生物量,T1、T2 与 CK 之间的生物量也没有显著差异 ($P>0.05$)。

在拔节孕穗期(2004-03-29)取 CK 与 T2 的表层土(约 0.5 cm)和下层土(地下 10 cm 以上),测定土壤微生物的相关指标(表 2)。T2 显著增加了下层土壤微生物的 C 含量。T2 表层和下层土的亚硝酸氧化菌的数量明显高于 CK,说明 T2 根际土壤的硝化作用有可能增强(因本次实验未测定土壤的硝化和反硝化强度,故不能完全肯定)。另外,有研究认为土壤充水孔隙度(WFPS; Water-filled-pore-space)75%是硝化和反硝化作用转换的分界点:WFPS 小于 75%,硝化作用是土壤主要的 N 素转化过程;WFPS 大于 75%,硝化作用受抑制,反硝化作用占主导地位^[27]。本次采样土壤的 WFPS 不到 30%,说明 N₂O 的产生主要是硝化作用的结果。

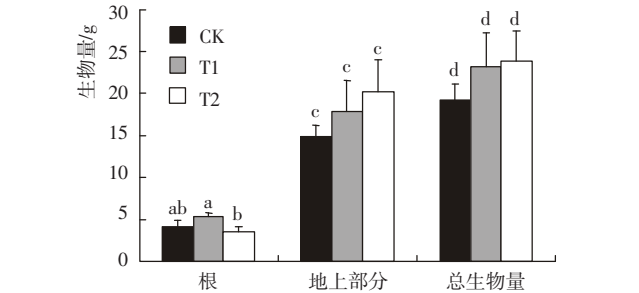


图 6a UV-A 辐射增强对抽穗期植株生物量的影响

Figure 6a Effects of enhanced UV-A radiation on biomass of winter-wheat at heading stage

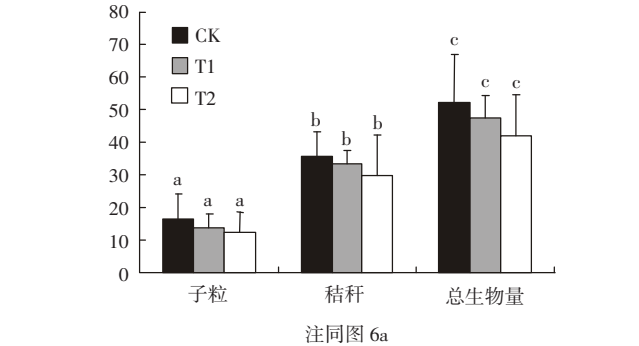


图 6b UV-A 辐射增强对收获生物量的影响

Figure 6b Effects of enhanced UV-A radiation on biomass of winter-wheat at harvest

表 2 UV-A 辐射增强对冬小麦根区土壤微生物相关指标的影响						
Table 2 Effects of enhanced UV-A radiation on soil microbial items related to N ₂ O emission of soil-winter wheat system						
处理	微生物 C/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		微生物 N/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		亚硝酸氧化菌/ $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ 干土	
	~0.5 cm 土壤	~10 cm 土壤	~0.5 cm 土壤	~10 cm 土壤	~0.5 cm 土壤	~10 cm 土壤
CK	156.54	120.30	9.40	7.40	1 246	538
T2	195.09	203.24	10.90	8.30	52 042	17 018

3 结论

(1)UV-A 辐射增强增大了裸土的呼吸速率和 N_2O 排放通量,增加了裸土呼吸量和 N_2O 累积排放量。

(2)UV-A 辐射增强没有改变土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放通量的季节性变化规律,对呼吸速率的大小没有影响。UV-A 增强 10%处理没有影响土壤-冬小麦系统的 N_2O 排放,但增强 20%处理显著促进了 N_2O 排放,其 N_2O 累积排放总量比对照的高 33%。

(3)UV-A 辐射增强没有显著影响冬小麦生物量,但增强 20%处理下土壤微生物碳和亚硝酸氧化菌的数量明显高于对照。

参考文献:

[1] IPCC, Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases, Houghton J T, et al. (ed.) Climate change 2001: the Scientific Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 248–253.

[2] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effects[J]. *Science*, 1990, 248: 1217–1219.

[3] Bronson K F, Mosier A R, Bishnoi S R. Nitrous oxide emission in irrigated corn as affected by nitrification inhibitors [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 161–165.

[4] Mosier A R, Kroeze C. Contribution of agroecosystems to the global atmospheric N_2O budget [J]. *Proceedings of International Workshop on Reducing N_2O Emission from Agroecosystems*, Banff, Canada, March, 1999.

[5] IPCC. Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases[C]. In: Houghton J T et al. (ed.) Climate Change 2001: the Scientific Basis[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 183–238.

[6] Caldwell M M, Flint S D, Searles P S. Spectral balance and UV-B sensitivity of soybean: a field experiment[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1994, 17: 267–276.

[7] Krizek D T. Influence of PAR and UV-A in determining plant sensitivity and photomorphogenic responses to UV-B radiation [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2004, 79(4): 307–315.

[8] Joshi P N, Pamaswamy N K, Iyer P K, et al. Partial protection of photosynthetic apparatus from UV-B-induced damaged by UV-A radiation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, doi: 10.1016/j.envexpbot. 2005. 11. 005.

[9] Nigel D P and Dylan G J. Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18 (1): 48–55.

[10] 郑有飞,石广玉,何金海,等. 南京地区紫外辐射初步研究[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 235–241.

[11] 郭世昌,常有礼,胡 非,等. 纬度和海拔高度对云南地面紫外线

强度影响的数值试验[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(1): 9–13.

[12] 王 晶,侯红英. 青岛地区太阳紫外线辐射研究[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(4): 671–676.

[13] 祝青林,于贵瑞,蔡 福,等. 中国紫外辐射的空间分布特征[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 108–113.

[14] Li Y, Yue M, Wang X L. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on crop structure, growth and yield components of spring wheat under field conditions [J]. *Field Crops Research*, 1998, 57: 253–263.

[15] 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.

[16] Johnson D, Campbell C D, Lee J A, et al. Arctic microorganisms respond more to elevated UV-B radiation than CO_2 [J]. *Nature*, 2002, 416: 82–83.

[17] 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.

[18] Kuchel J M, Barnetson R S, Halliday G M. Ultraviolet A augments solar-simulated ultraviolet radiation-induced local suppression of recall responses in humans[J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2002, 118: 1032–1037.

[19] He Y Y, Huang J L, Gentry J B, et al. Epidermal growth factor receptor down-regulation induced by UVA in human keratinocytes does not require the receptor kinase activity[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2003, 278: 42457–42465.

[20] He Y Y, Huang J L, Chignell C F. Delayed and sustained activation of extra cellular signal-regulated kinase in human keratinocytes by UVA [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2004, 279: 53867–53874.

[21] Schieke I S M, Ruwiedel I K, Gers-Barlag H, et al. Molecular crosstalk of the ultraviolet A and ultraviolet B signaling responses at the level of mitogen-activated protein kinases[J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 2005, 124: 857–859.

[22] Krizek D T, Britz S J, Mirecki R M. Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of cv. New Red Fire lettuce[J]. *Physiologia Plantarum*, 1998, 103(1): 1–7.

[23] Krizek D T, Britz S J, Mirecki R M. Inhibitory effects of ambient levels of solar UV-A and UV-B radiation on growth of cucumber[J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, 100(4): 886–893.

[24] Niemi R, Martikainen P, Silvola J, et al. Elevated UV-B radiation alters fluxes of methane and carbon dioxide in peatland microcosms[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 361–371.

[25] 黄 耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 77–78.

[26] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-time ecosystem[J]. *Advance of Atmospheric Science*, 2003, 20(5): 842–844.

[27] Panek J A, Matson P A, Ortyz-Monasterio I, et al. Distinguishing nitrification and denitrification sources of N_2O in a Mexican wheat system using ^{15}N [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):506–514.