

UV-B 辐射增强对冬小麦生态系统呼吸速率和 N₂O 排放日变化的影响

杨燕萍, 胡正华, 李涵茂, 陈书涛, 季雨虹, 李岑子

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要:通过田间试验,应用静态箱-气相色谱法测定了土壤-冬小麦系统以及土壤的呼吸速率和 N₂O 排放通量,研究了 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统、土壤的呼吸速率和 N₂O 排放日变化的影响。结果表明,土壤-冬小麦系统和土壤的呼吸速率存在着明显的日变化规律,UV-B 辐射增强处理并没有改变其日变化规律,但对呼吸速率有抑制作用。在日温差较大的晴天,土壤-冬小麦系统和土壤的 N₂O 排放通量也呈规律性日变化,UV-B 辐射增强处理没有改变其日变化规律。在拔节至抽穗期,UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统的日均呼吸速率、N₂O 排放通量和土壤的日均 N₂O 排放通量均没有显著影响,但显著降低了土壤的日均呼吸速率;在开花期,UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统和土壤的日均呼吸速率、N₂O 排放通量均没有显著影响;在灌浆期,UV-B 辐射增强显著降低了土壤-冬小麦系统的日均呼吸速率、N₂O 排放通量和土壤的日均 N₂O 排放通量,但对土壤的日均呼吸速率没有显著影响。

关键词:UV-B 辐射;土壤-冬小麦系统;土壤;呼吸速率;N₂O;日变化

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)08-1733-09

Influence of Enhanced UV-B Radiation on Diurnal Variations of Respiration Rate and N₂O Emission from Winter Wheat Ecosystem

YANG Yan-ping, HU Zheng-hua, LI Han-mao, CHEN Shu-tao, JI Yu-hong, LI Cen-zi

(College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Due to the depletion of stratospheric ozone layer and its slow process of recovery, extensive work has been done to understand the effect of enhanced UV-B (280~320 nm) radiation on agricultural ecosystem. However, so far no report has been available regarding the influence of enhanced UV-B radiation on diurnal variations of respiration rate and N₂O emission. With static chamber-gas chromatography method, field experiments were carried out to investigate the influence of enhanced UV-B radiation on diurnal variations of respiration rate and N₂O emission from wheat field ecosystems. Results indicated that, an obvious diurnal variation of respiration rate was observed in soil-winter wheat system and soil, but not changed with the enhanced UV-B radiation, except for the inhibition of respiration rate. On sunny days with large difference in daily temperature, N₂O emission also showed a diurnal variation, but not changed with the enhanced UV-B radiation. At jointing, booting and heading stages, enhanced UV-B radiation significantly declined daily mean soil respiration rate ($P=0.000$, 0.004 , 0.022 , respectively) but had no significant impact on daily mean respiration rate or N₂O emission from soil-winter wheat system as well as daily mean N₂O emission from soil ($P>0.05$). While the daily mean respiration rate and N₂O emission from soil-winter wheat system as well as soil were not found to be significantly different at flowering under enhanced UV-B radiation ($P>0.05$). At filling stage, enhanced UV-B radiation significantly declined the daily mean respiration rate by 23% ($P=0.049$) and N₂O emission by 48% ($P=0.017$) from soil-winter wheat system as well as the daily mean N₂O emission by 37% from soil ($P=0.027$) but had no significant impact on daily mean soil respiration rate ($P>0.05$).

Keywords: UV-B radiation; soil-winter wheat system; soil; respiration rate; N₂O; diurnal variation

收稿日期:2008-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029);中国博士后科学基金资助项目(20070420195)

作者简介:杨燕萍(1984—),女,江苏无锡人,硕士生,主要从事全球变化生态学研究。E-mail:yyypst@126.com

通讯作者:胡正华 E-mail:zhhu@nuist.edu.cn

全球变暖和地表紫外辐射增强是当今重大全球环境问题。农田生态系统作为人类活动最活跃的部分,是温室气体重要排放源,其产生与排放 CO₂ 和 N₂O 的过程,不仅是陆地生态系统碳氮循环的重要过程,也是土壤碳氮库的主要输出途径^[1]。据 IPCC 第四次评估报告,农田生态系统的 CO₂ 排放量占全球人为排放量的 10%~12%,而 N₂O 则占到 60%^[2]。

由于大气中 CFCs 含量的升高导致平流层臭氧浓度减小,而温室气体 N₂O 的参与则使臭氧层的修复变得更加缓慢^[3]。预测表明,平流层臭氧至少到 2050 年才能恢复到 1980 年的水平^[4-5]。臭氧层损耗导致的地表 UV-B 辐射增强对农田生态系统影响显著,不仅降低作物的光合与蒸腾速率^[6-8],导致生物量和产量下降^[9-10],还影响作物的其他生理生态过程^[11-12],并能改变土壤微生物的群落组成与活性^[13-14]。而作物生长和土壤微生物是影响农田温室气体产生和排放的重要因素,因此 UV-B 辐射增强可能影响到农田温室气体的排放。

以往的研究仅对农田温室气体排放的日变化^[15-16]和 UV-B 辐射增强条件下农田温室气体的排放情况^[17-18]进行观测试验,对 UV-B 辐射增强对农田呼吸速率和 N₂O 排放日变化的影响规律则鲜有报道。本研究通过人工模拟 UV-B 辐射增强,测定土壤-冬小麦系统以及土壤的呼吸速率和 N₂O 排放通量,探讨 UV-B 辐射增强对冬小麦生态系统呼吸速率和 N₂O 排放日变化的影响规律,为客观评价紫外辐射的生态效应和预测 UV-B 辐射增强前景下区域农田温室气体排放趋势提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与田间管理

田间试验于 2007—2008 年冬小麦生长季在南京信息工程大学生态与农业气象试验站进行。供试土壤为潞育型水稻土,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 6.2,有机碳、全氮的含量分别为 19.4、1.45 g·kg⁻¹。

供试小麦品种为扬麦 12 号,于冬小麦返青期(2008 年 2 月 24 日)开始 UV-B 辐射增强处理,直至收获。每天处理时间为 8:00—16:00,阴雨天停止照射。冬小麦主要生育期和肥料管理见表 1。

1.2 试验设计

设对照小区(CK)与 UV-B 辐射增强小区(T)。冬小麦试验的同时设置无作物和杂草的裸地,以测定土

表 1 冬小麦主要生育期和肥料管理

Table 1 Developmental stages of winter wheat and fertilizer management

日期	生育期与肥料管理
2007-11-12	播种,底肥施用量:复合肥 112 g·m ⁻² ,尿素 45 g·m ⁻²
2007-11-24	出苗
2008-01-13	越冬肥施用量:复合肥 30 g·m ⁻² ,尿素 11 g·m ⁻²
2008-02-19	返青肥施用量:尿素 22 g·m ⁻²
2008-03-20	拔节肥施用量与 2008-02-19 相同
2008-04-18	齐穗
2008-05-28	收获

壤的呼吸速率和 N₂O 排放通量,不同处理间均设置 3 组重复。

采用人工增强紫外辐射的方法,将 UV-B 灯管(40 W,峰值 313 nm,上海华德电光源厂)悬挂于作物上方,用于模拟 UV-B 辐射增强。本研究将 UV-B 增强幅度设为 20%,用 UV-B 辐射探头(SKU430,光谱范围 280~315 nm,英国 Skye 公司)和数字采集器(Skye-Datahog, Skye 公司)自动记录 CK 和 T 处理的 UV-B 强度,并通过调节灯管高度和电流输出强度保证 T 比 CK 的 UV-B 辐射强度高 20%。

在 T 与 CK 小区均悬挂 UV-B 灯管,CK 的灯管外包裹有 Mylar 膜(厚度 125 μm,美国杜邦公司),以滤掉 320 nm 以下的波段,保证 T 与 CK 相比仅仅是 UV-B 增强,而其他环境条件(自然光、少许 UV-A 和 PAR)相同^[18]。为防止因 Mylar 膜光分解而导致的 UV-B 过滤不均, Mylar 膜每周更换 1 次。

1.3 采样与分析

按小麦生育期,分别在拔节、孕穗、抽穗、开花和灌浆期各选一天,进行日变化观测。一般选在日温差较大的晴天,8:00—18:00,每隔 2 h 采样 1 次。采集气体样品的同时,测定采样开始和结束时的气温、10 cm 地温和土壤湿度等环境因子指标。

采用静态箱-气相色谱法对气体样品进行采集与分析。采样箱高 1 m,由 PVC 管和遮光隔热材料制成。采集气样前将采样箱罩于采样底座上,连接好采气设备和温度计,向凹槽中加水密封。分别于 0、10、20 min 时采集气体样品各 50 mL,用经改装的 Agilent 6890N 型气相色谱仪同步分析气样中 CO₂ 和 N₂O 的浓度。通过对每组 3 个样品的目标气体混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行直线回归,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^[19]。土壤-冬小麦系统和

土壤的呼吸速率通过测定 CO_2 的排放量来确定。

土壤-冬小麦系统的呼吸速率和 N_2O 排放通量包括植株和土壤两部分,同时进行的裸土试验不包括植株部分。土壤-冬小麦系统的排放量减去裸土的排放量即为冬小麦植株的排放量。

1.4 统计分析

应用统计软件 OriginPro7.5 和 Excel 完成数据统

计分析。

2 结果

2.1 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统和土壤呼吸速率日变化的影响

土壤-冬小麦系统和土壤呼吸速率日变化见图1。3月17日、3月28日、4月7日、4月14日和4月28日

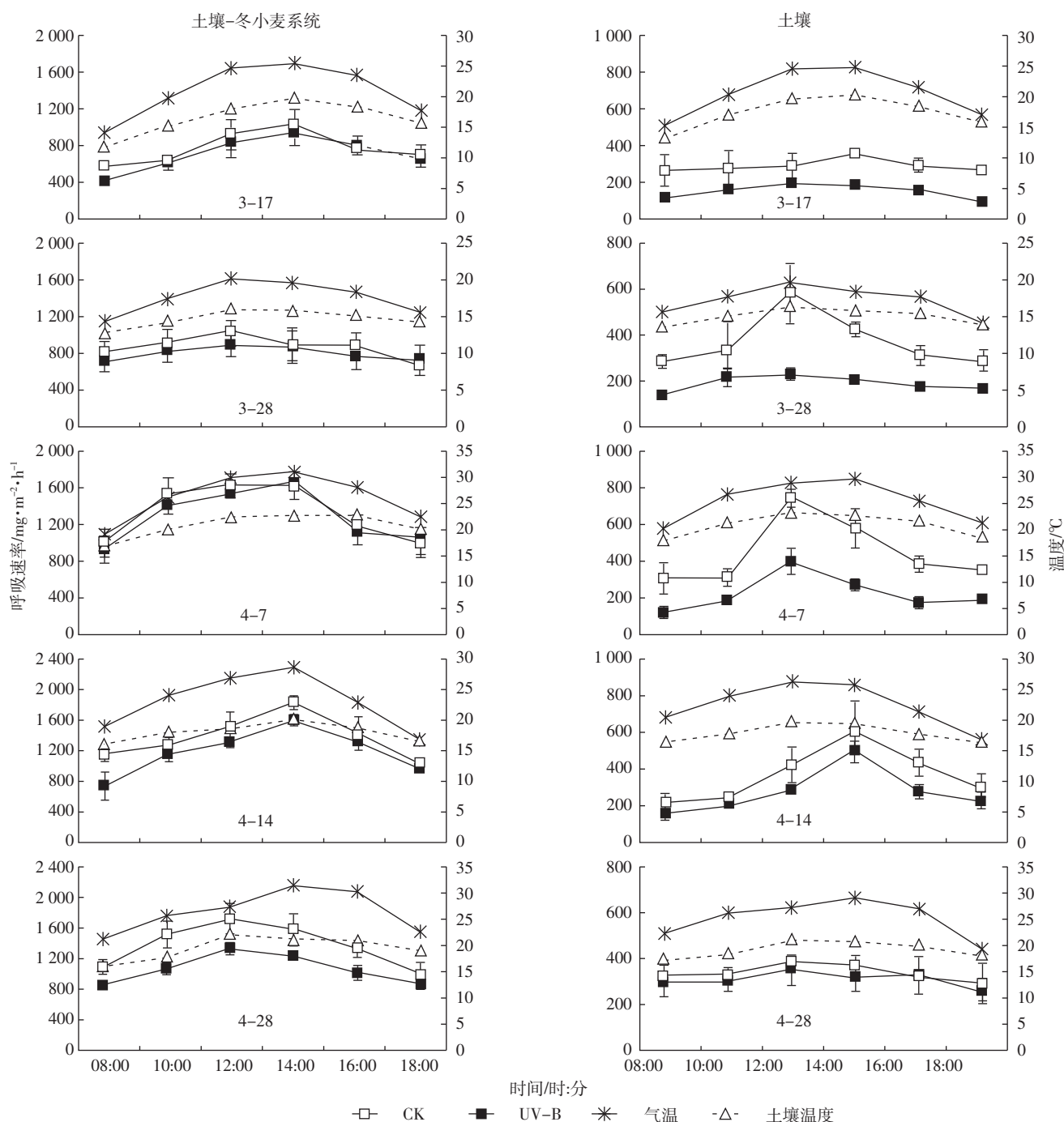


图1 土壤-冬小麦系统和土壤呼吸速率日变化

Figure 1 Diurnal variations of respiration rate of soil-winter wheat system and soil

分别为冬小麦生长的拔节、孕穗、抽穗、开花和灌浆期。5 次测定结果表明,土壤-冬小麦系统的呼吸速率存在着明显的日变化规律。在不同生育期,CK 和 T 的土壤-冬小麦系统日呼吸速率均呈单峰变化,即从 8:00 起呼吸速率逐步增大,12:00 或 14:00 达到峰值,然后逐渐降低。UV-B 辐射增强没有改变土壤-冬小麦系统呼吸速率的日变化规律,但对各生育期的呼吸速率有抑制作用。对 CK 和 T 的土壤-冬小麦系统日均呼吸速率(每个采样日 6 个采样时间点测定的呼吸速率取算术平均值)进行方差分析,结果表明拔节、孕穗、抽穗和开花期均无明显差异(P 值分别为 0.566、0.0227、0.816、0.281),但在灌浆期差异显著($P=0.049$),UV-B 辐射增强使其呼吸速率降低了 23%。

与土壤-冬小麦系统呼吸速率的日变化相类似,CK 和 T 的土壤呼吸速率也呈单峰变化规律,即 12:00 或 14:00 的呼吸速率最高,而 8:00 和 18:00 的呼吸速率相对较低(图 1)。UV-B 辐射增强也没有改变土壤呼吸速率的日变化规律,但降低了各生育期的土壤呼吸速率。在拔节、孕穗和抽穗期的测定中,T 的土壤呼吸速率约是 CK 的一半,而灌浆期 T 的土壤呼吸速率则仅略低于 CK。对 CK 和 T 的土壤日均呼吸速率进行方差分析,结果表明拔节和孕穗期差异极显著(P 值分别为 0.000、0.004),抽穗期差异也达到显著水平($P=0.022$),开花期和灌浆期则无明显差异(P 值分别为 0.242、0.166)。

2.2 UV-B 辐射增强对植株呼吸速率日变化的影响

土壤-冬小麦系统的呼吸速率减去土壤的呼吸速率,差值即为植株的呼吸速率。结果表明,CK 和 T 的植株呼吸速率基本上也呈单峰变化规律(图 2)。5 个采样日中,拔节、孕穗和抽穗期 T 植株的呼吸速率普遍略高于 CK 的呼吸速率,开花期则略低,而灌浆期

则明显低于 CK 的呼吸速率。将求得的每个采样日 6 个采样时间点的植株呼吸速率取算术平均值,可得拔节、孕穗、抽穗、开花和灌浆期 CK 的呼吸速率分别为 480.7 ± 146.3 (标准差)、 510.5 ± 78.2 、 873.9 ± 211.4 、 1015.0 ± 154.3 和 $1041.7 \pm 251.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;而 T 的呼吸速率则分别为 562.9 ± 153.5 、 623.7 ± 43.1 、 1062.3 ± 216.2 、 925.7 ± 191.8 和 $755.7 \pm 170.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对 CK 和 T 的植株日均呼吸速率进行方差分析,结果表明孕穗和灌浆期差异显著(P 值分别为 0.011、0.044),拔节、抽穗和开花期则无明显差异(P 值分别为 0.364、0.158、0.395)。

2.3 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 排放日变化的影响

土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 排放通量的日变化见图 3。各生育期的测定结果表明,土壤-冬小麦系统 N_2O 排放的日变化形式表现为随机性和规律性两种。拔节、开花和灌浆期,CK 和 T 的土壤-冬小麦系统 N_2O 排放通量均呈单峰变化,且 T 的 N_2O 排放通量普遍低于 CK,而孕穗和抽穗期则呈随机排放。对两者日均排放通量的方差分析表明,拔节、孕穗、抽穗和开花期的差异均未达到显著水平(P 值分别为 0.417、0.752、0.800、0.849),但在灌浆期差异显著($P=0.017$),UV-B 辐射增强使土壤-冬小麦系统 N_2O 的排放通量降低了 48%。可见,在土壤水分、养分等状况相对稳定,且日温差较大的晴天,土壤-冬小麦系统的 N_2O 排放呈规律性日变化,UV-B 辐射增强没有改变其日变化规律。孕穗期因日均温度(17.5°C)和日温差(5°C)都较低,而抽穗期因土壤湿度过低(13%),使得 N_2O 均呈随机性排放。

与土壤-冬小麦系统 N_2O 排放规律相类似,CK 和 T 的土壤 N_2O 排放日变化也呈随机和规律两种形

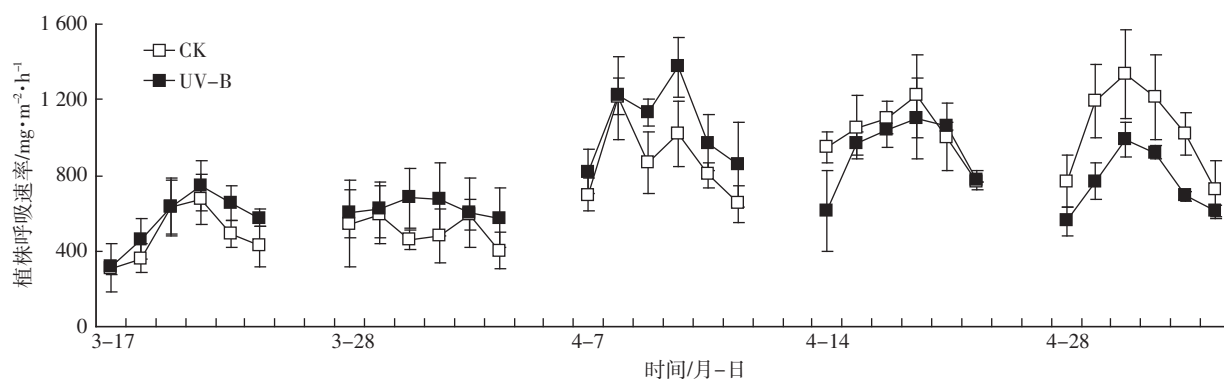


图 2 植株呼吸速率日变化

Figure 2 Diurnal variations of respiration rate of wheat

式(图3)。除抽穗期外,CK和T的土壤 N_2O 排放均呈规律性单峰变化,且在各生育期,UV-B辐射增强处理均降低了土壤的 N_2O 排放通量。将每个采样日6个采样时间点测定的土壤 N_2O 排放通量取算术平均值,可求得UV-B辐射增强处理使各生育期土壤 N_2O 的日均排放量分别降低了11%、12%、20%、21%和37%。拔节、孕穗、抽穗和开花期,CK和T的土壤日均 N_2O

排放通量均无明显差异(P 值分别为0.528、0.568、0.311、0.406),而灌浆期差异显著($P=0.027$)。

3 讨论

3.1 冬小麦生态系统呼吸速率和 N_2O 排放日变化的影响因素

土壤-冬小麦系统和土壤呼吸速率的日变化规律

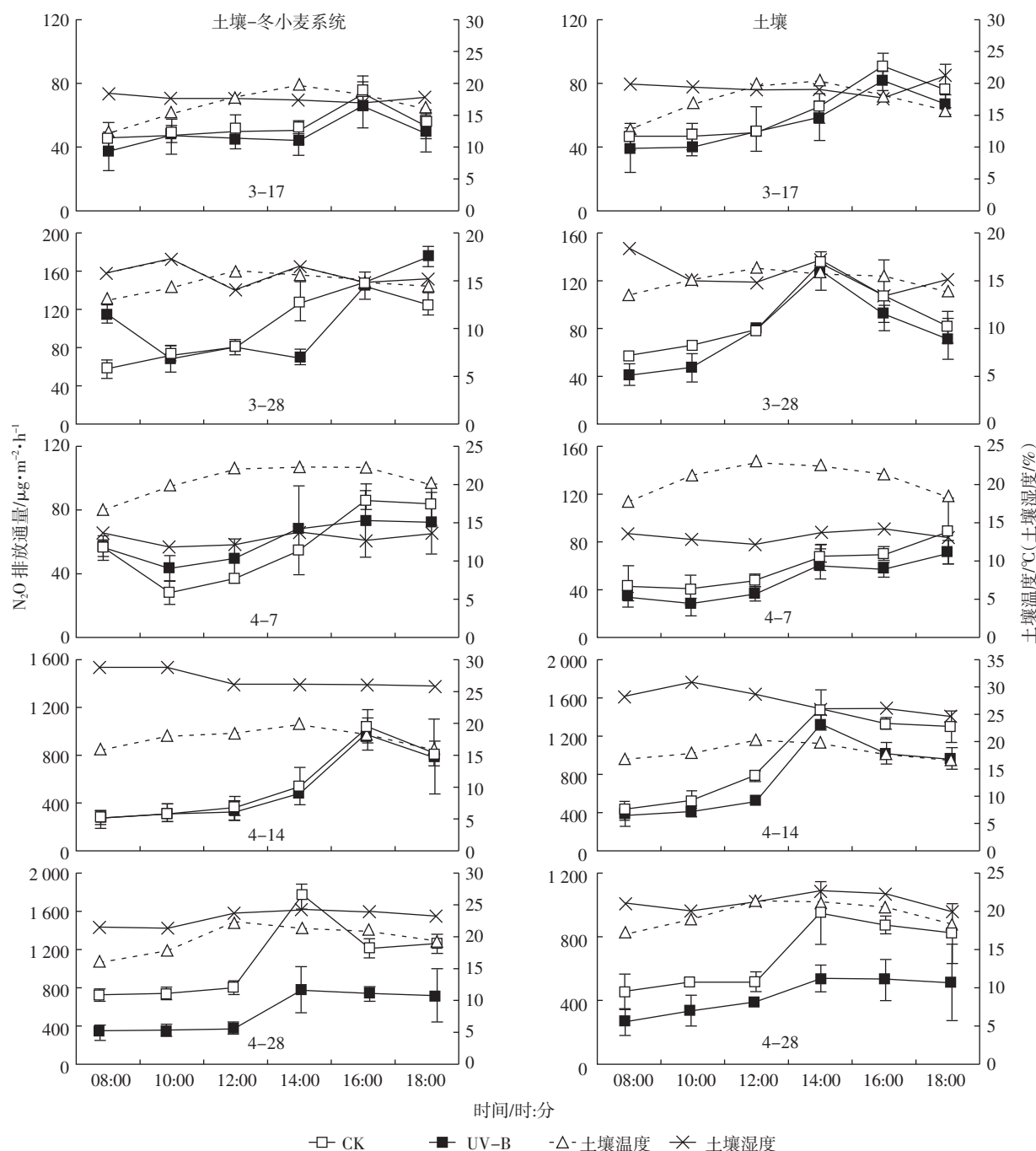


图3 土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 排放通量日变化

Figure 3 Diurnal variations of N_2O emission from soil-winter wheat system and soil

与气温和土温的日变化规律基本相似,可见温度是影响冬小麦系统呼吸速率日变化的关键因子。而其他环境变量在一天内的变化相对较小,对其影响不明显,这与陈述悦^[20]、韩广轩^[21]等的研究结果一致。分析其原因可能有以下几方面:第一,温度可通过对酶活性的控制,影响植株呼吸速率;第二,土壤温度可直接影响植物的生长和生理活动,从而影响根系呼吸;第三,在一定范围内,温度升高可改变土壤有机质的物理化学状态,使之更易分解^[22],同时还可增强土壤微生物的活性,加速土壤中有有机质的分解,从而增加土壤呼吸速率。此外,土壤温度亦影响土壤中 CO_2 向大气输送的过程,土壤温度升高, CO_2 向大气的排放增强^[23]。

土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 排放通量的日变化形式表现为规律性和随机性两种。规律性日变化通常发生在土壤水分、养分等状况都相对稳定,且日温差较大的晴天。当上述影响因子日变化较显著或是含量过低而成为限制因子时, N_2O 排放通量的日变化表现为随机性。研究发现,在土壤湿度适宜的一定温度范围内, N_2O 的排放通量与温度呈正相关^[24]。因此,只有在土壤条件、气候因素和植物体维持相对稳定的前提下,温度才能成为 N_2O 排放通量规律性日变化的最主要决定因素,而土壤湿度则影响着由温度条件所决定的 N_2O 排放潜力的正常发挥。进一步研究发现,无论是土壤-冬小麦系统还是土壤,其 CK 和 T 的 N_2O 日排放峰值均比温度峰值延后 2 h,这与郑循华^[16]、徐文彬^[25]等的研究结果一致。其可能的原因是土壤中产生 N_2O 的酶活性对温度变化的响应滞后的结果,具体原因还有待于深入研究。

农田 N_2O 的排放是土壤微生物参与的硝化-反硝化作用的结果,而土壤水分状况和土壤温度是影响其排放的两大环境因素。除灌溉外,导致冬小麦田土壤水分状况变化的最主要因素是降水事件。有研究表明,冬小麦田 N_2O 排放通量与观测日前一星期内的降水情况显著相关^[26],当土壤含水量既能促进硝化作用又能促进反硝化作用时,会导致最多的 N_2O 生成与排放^[27]。而温度会影响土壤中产生 N_2O 的硝化和反硝化细菌等微生物的活性,在适宜的土壤湿度条件下,农田 N_2O 排放往往会受到土壤温度的调节。开花-灌浆期,土壤-冬小麦系统和土壤的 N_2O 日排放量均显著增加,可能是降水与施用化肥共同作用的结果。一方面,在冬小麦生长前期,土壤湿度较低,此时土壤以发生硝化作用为主, N_2O 生成量微弱,呈低排放平台,进入雨季后,降水事件频繁,土壤湿度增大,此时土壤则

以进行反硝化作用为主,生成较多的 N_2O ;另一方面,国内外研究均表明,施肥对旱地小麦-土壤系统 N_2O 排放具有重要影响^[28-30],施肥后土壤中含氮物质质量明显增加,使得土壤中硝化和反硝化反应加速进行,导致 N_2O 排放量增多。

3.2 UV-B 辐射增强对冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放日变化的影响

UV-B 辐射增强基本上没有改变土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放的日变化规律,但对呼吸速率和 N_2O 排放有抑制作用。方差分析结果表明,随着辐射期的不断延长,UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N_2O 排放的抑制作用愈加明显。分析其原因可能是 UV-B 辐射增强主要通过影响冬小麦的生长而抑制其呼吸速率和 N_2O 排放。因此,随着植株生长和 UV-B 增强的持续处理,UV-B 对植株的生物学效应日趋明显。受 UV-B 胁迫,植株的光合与蒸腾速率降低,气孔阻力增大,有机物质积累受阻,生物量降低^[31],整个系统的呼吸速率也随之降低。同时,UV-B 辐射增强可通过抑制光合作用,影响到根系生长和根系分泌物的变化,使根系对离子的吸收和有机酸的分泌发生改变,从而改变根际土壤的 pH 值,影响土壤微生物的硝化和反硝化过程,进而影响到系统 N_2O 的排放。另据研究发现,UV-B 辐射增强处理不仅会降低氮利用率和氮代谢^[32-33],还会改变叶片中 NO_3^--N 的转化过程,使得大部分 NO_3^--N 还原生成 NH_3 并进一步合成氨基酸,而异化还原生成的 N_2O 量降低,从而减少了 N_2O 的排放通量^[17]。

UV-B 辐射增强基本上也没有改变土壤呼吸速率和 N_2O 排放的日变化规律,但在不同生育期 UV-B 辐射增强对两者的影响存在差异。UV-B 辐射增强处理极显著降低了拔节-孕穗期的土壤日均呼吸速率,显著降低了抽穗期的土壤日均呼吸速率,对开花-灌浆期的土壤日均呼吸速率则无显著影响。分析其可能原因有:小麦生长初期,地上部分生物量较小,覆盖度低,UV-B 可直接照射到土壤上,从而影响土壤的呼吸速率;而后随着植株的不断生长,差异性逐渐消失,拔节至开花期,UV-B 辐射增强对土壤 N_2O 的日均排放通量均无显著影响,但对灌浆期的日均排放通量影响显著。这可能是因为冬小麦生长前期,土壤 N_2O 呈低排放平台,差异不显著;而后在降水与施用化肥的共同作用下,土壤 N_2O 的日均排放量明显增加,差异也显著。

另据研究表明,植物不仅可与土壤相互作用,极

大地影响土壤-植物系统中 N_2O 的排放^[34-35],而且其自身也是重要的 N_2O 排放源^[36-38]。鉴于究竟是植物自身释放的 N_2O ,还是作为通道将土壤中已经产生并溶解在水中的 N_2O 排入大气难以区分,对 UV-B 辐射增强对植株 N_2O 排放日变化的影响本文暂不予讨论。

3.3 UV-B 辐射增强对冬小麦植株呼吸速率日变化的影响

植株呼吸速率基本上也呈单峰变化规律,UV-B 辐射增强也没有改变其日变化规律,但经一定时间的照射后,UV-B 辐射增强显著降低了植株呼吸速率。我们认为可能有以下两方面原因:一方面,UV-B 辐射增强可能通过降低植株的单位面积生物量,从而抑制冬小麦植株的呼吸速率。生物量作为衡量 UV-B 辐射增强对植物生长影响的重要指标,代表了所有生化、生理和生长因子长期变化的完整性。大量研究表明,UV-B 辐射增强会使植株矮化、叶面积减小、绿叶数减少^[39-40],光合速率下降^[6-8],有机物质积累受阻,从而降低植株的单位面积生物量^[31,41]。另一方面,UV-B 辐射增强可能通过影响植株的生理生态及物质代谢过程,影响植株的呼吸速率。研究表明,UV-B 辐射增强可减少植株叶绿素含量^[42],增大气孔阻力,降低气孔导度^[43-44],影响蛋白质的正常代谢^[45],并直接破坏光合系统酶活性^[46],降低光合速率和碳代谢,还可改变抗氧化酶活性^[41,47],导致植株生理代谢紊乱,从而影响植株的呼吸速率。

4 结论

土壤-冬小麦系统和土壤的呼吸速率存在着明显的日变化规律,UV-B 辐射增强处理并未改变其日变化规律,但对呼吸速率有抑制作用。拔节至开花期,UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统的日均呼吸速率无显著影响,但显著降低了灌浆期的日均呼吸速率;UV-B 辐射增强极显著降低了拔节-孕穗期的土壤日均呼吸速率,显著降低了抽穗期的土壤日均呼吸速率,对开花-灌浆期的土壤日均呼吸速率则无显著影响。

土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 排放日变化表现为规律性和随机性两种形式。在日温差较大的晴天,土壤-冬小麦系统和土壤的 N_2O 排放呈规律性日变化,UV-B 辐射增强处理未改变其日变化规律。拔节至开花期,UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统和土壤 N_2O 的日均排放通量均无显著影响,但显著降低了两者灌浆期 N_2O 的日均排放通量。

植株呼吸速率基本上也呈单峰变化规律,UV-B 辐射增强处理也未改变其日变化规律。UV-B 辐射增强显著增加了孕穗期的植株日均呼吸速率,但显著降低了灌浆期的植株日均呼吸速率,对拔节、抽穗和开花期则无显著影响。

参考文献:

- [1] Koponen H T, Flojt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: a laboratory microcosm study [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(5): 757-766.
- [2] IPCC: Climate Change. 2007. <http://www.ipcc.ch/>
- [3] Weatherhead E C, Reinsel G C, Tiao G C, et al. Detecting the recovery of total column ozone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 22201-22210.
- [4] Andrady A, Aucamp P J, Bais A F, et al. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Progress report, 2007[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2008, 17(1): 15-27.
- [5] 李春梅, 胡建信, 徐建华, 等. 消耗臭氧层物质对平流层臭氧的影响预测[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 142-145.
LI Chun-mei, HU Jian-xin, XU Jian-hua, et al. Prediction on the influence of ozone depletion substance to the stratospheric ozone[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 142-145.
- [6] 郑有飞, 杨志敏, 颜景义, 等. 作物对太阳紫外线辐射增加的生物效应及其评估[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(1): 107-109.
ZHENG You-fei, YANG Zhi-min, YAN Jing-yi, et al. Biological response of crops on enhanced solar ultraviolet radiation and its estimation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(1): 107-109.
- [7] 罗南书, 钟章成. 田间增加 UV-B 辐射对玉米光合生理的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 369-373.
LUO Nan-shu, ZHONG Zhang-cheng. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on photosynthesis of maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 369-373.
- [8] YANG Shu-hua, WANG Li-jun, LI Shao-hua, et al. The effects of UV-B radiation on photosynthesis in relation to Photosystem II photochemistry, thermal dissipation and antioxidant defenses in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings at different growth temperatures [J]. *Functional Plant Biology*, 2007, 34(10): 907-917.
- [9] YAO Yi-nan, XUAN Zu-ying, LI Yuan, et al. Effects of ultraviolet-B radiation on crop growth, development, yield and leaf pigment concentration of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) under field conditions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 215-222.
- [10] Agrawal S B, Rathore Dheeral, Singh Anoop. Combined effects of enhanced ultraviolet-B radiation and mineral nutrients on growth, biomass accumulation and yield characteristics of two cultivars of *Vigna radiate* L.[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2006, 27(1): 55-60.
- [11] Pandey J, Chaplot Kanambari. Effects of enhanced UV-B radiation on physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Research on Crops*, 2007, 8(2): 401-405.
- [12] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(3): 1044-1052.

- CAI Xi-an, XIA Han-ping, PENG Shao-lin. Effects of enhanced UV-B radiation on plants[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):1044-1052.
- [13] 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.
- LI Yuan, YANG Ji-long, WANG Xun-ling. The effect of UV-B radiation on the population quantity of spring wheat rhizosphere microorganisms[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(2):157-160.
- [14] 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.
- [15] 王少彬, 宋文质, 苏维瀚, 等. 冬小麦田氧化亚氮的排放[J]. 农业环境保护, 1994, 13(5):210-212.
- WANG Shao-bin, SONG Wen-zhi, SU Wei-han, et al. Emissions of N₂O from winter-wheat fields[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(5):210-212.
- [16] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):1-6.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impacts of temperature on N₂O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5):1-6.
- [17] 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):16-20.
- JIANG Jing-yan, NIU Chuan-po, HU Zheng-hua, et al. Study on mechanism of enhanced UV-B radiation influencing on N₂O emission from soil-winter wheat system[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9):16-20.
- [18] 胡正华, 蒋静艳, 牛传坡, 等. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3):449-454.
- HU Zheng-hua, JIANG Jing-yan, NIU Chuan-po, et al. Influence of enhanced UV-B radiation on respiration rate and N₂O emission from soil-winter wheat system[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):449-454.
- [19] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京:气象出版社, 2003:71-83.
- HUANG Yao. Exchange between soil and atmosphere: from experiment to model[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003:71-83.
- [20] 陈述悦. 华北平原典型农田土壤呼吸的研究[D]. 北京:北京林业大学硕士论文, 2004:15-33.
- CHEN Shu-yue. Soil respiration in the typical farm-land in the north China plain[D]. Beijing: Dissertation of Master Degree, Beijing Forestry University, 2004:15-33.
- [21] HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu, et al. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291:15-26.
- [22] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分[J]. 生态学报, 2006, 26(6):1693-1700.
- ZHU Jin-xiang, ZHANG Xiao-quan. Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6):1693-1700.
- [23] TANG Jian-wu, Dennis D B, QI Ye, et al. Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-state sensors[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118:207-220.
- [24] Simojoki A, Jaakkola A. Effect of nitrogen fertilization, cropping and irrigation on soil air composition and nitrous oxide emissions in a loamy clay[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(3):413-424.
- [25] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1):1-8.
- XU Wen-bin, LIU Wei-ping, LIU Guang-shen. Effect of temperature on N₂O emission from sub-tropical upland soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):1-8.
- [26] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6):20-23.
- HUANG Yao, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang, et al. Influence of planting density and precipitation on N₂O emission from a winter wheat field[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(6):20-23.
- [27] 邹建文, 黄耀. 农业管理措施对 N₂O 排放的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1):46-49.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao. Effect of agricultural management practices on N₂O emission of farmlands[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1):46-49.
- [28] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factor[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D21):26891-26899.
- [29] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Denitrification, N₂O and CO₂ fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34:375-389.
- [30] ZHENG Xun-hua, HAN Sheng-hui, HUANG Yao, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2):1-19.
- [31] 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.
- [32] Solheim B, Zielke M, Bjerke J W, et al. Effect of enhanced UV-B radiation on nitrogen fixation in arctic ecosystems[J]. *Plant Ecology*, 2006, 182:109-118.
- [33] Rajendiran K, Ramanujam M P. Interactive effects of UV-B irradiation and triadimefon on nodulation and nitrogen metabolism in *Vigna radiata* plants[J]. *Biologic Plantarum*, 2006, 50(4):709-712.
- [34] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 等. 几种旱地农作物在农田 N₂O 释放中的作用及环境因素的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4):387-391.
- YU Ke-wei, CHEN Guan-xiong, YANG Si-he, et al. Role of several upland crops in N₂O emission from farmland and its response to environmental factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4):387-391.

- [35] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 539–544.
JIANG Chang-sheng, WANG Yue-si, ZHENG Xun-hua, et al. CH₄ and N₂O emission from a winter-time flooded paddy field in a hilly area of Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 539–544.
- [36] Smart D R, Bloom A J. Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(14): 7875–7878.
- [37] 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.
CHEN Guan-xiong, XU Hui, ZHANG Ying, et al. Plant: a potential source of the atmospheric N₂O[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 504–511.
- [38] Rochette P, Anger D A, Belanger G, et al. Emission of N₂O from alfalfa and soybean crops in Eastern Canada[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(2): 493–506.
- [39] 张富存, 何雨红, 郑有飞, 等. UV-B 辐射增加对小麦的影响[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 545–551.
ZHANG Fu-cun, HE Yu-hong, ZHENG You-fei, et al. Effect of enhanced UV-B radiation on wheat[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(4): 545–551.
- [40] 张磊, 王连喜, 张晓煜, 等. UV-B 增强对中高海拔干旱半干旱地区春小麦植株形态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 80–85.
ZHANG Lei, WANG Lian-xi, ZHANG Xiao-yu, et al. Effects of enhanced ultraviolet radiation-B on plant form of spring wheat in arid and semiarid regions of middle-high elevation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2): 80–85.
- [41] Skorska E, Szwarz W. Influence of UV-B radiation on young triticale plants with different wax cover[J]. *Biologic Plantarum*, 2007, 51(1): 189–192.
- [42] Feng H Y, Li S W, Xue L G, et al. The interactive effects of enhanced UV-B radiation and soil drought on spring wheat[J]. *South African Journal of Botany*, 2007, 73: 429–434.
- [43] 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.
LI Yuan, WANG Xun-ling. The effect of enhanced UV-B radiation on the physiological indicator, yield and quality of wheat[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 504–509.
- [44] 贺军民, 余小平, 王瑞斌, 等. UV-B 辐射增强对 NaCl 胁迫下小麦幼苗生理生态的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(10): 1810–1815.
HE Jun-min, YU Xiao-ping, WANG Rui-bin, et al. Physiological and ecological effects of enhanced UV-B radiation on wheat seedling under NaCl stress condition[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(10): 1810–1815.
- [45] 牛传坡. UV-B 辐射对土壤-作物系统 N₂O 排放和呼吸速率的影响及机理探讨[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2007: 4–5.
NIU Chuan-po. Mechanism of N₂O emission and respiration in soil-crop systems under UV-B radiation[D]. Nanjing: Dissertation of Master Degree, Nanjing Agricultural University, 2007: 4–5.
- [46] 姚晓芹, 刘庆. 陆生植物体内酶系统对 UV-B 辐射增强的响应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 939–942.
YAO Xiao-qin, LIU Qing. Responses of enzymes in terrestrial plants to enhanced UV-B radiation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 939–942.
- [47] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 1044–1052.
CAI Xi-an, XIA Han-ping, PENG Shao-lin. Effects of enhanced UV-B radiation on plants[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 1044–1052.