

紫外(UV-B)辐射增强对拔节-孕穗期小麦植株呼吸和土壤呼吸的温度敏感性影响

陈书涛, 胡正华, 李涵茂, 季宇虹, 杨燕萍

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: 为研究紫外(UV-B)辐射增强对拔节-孕穗期麦田植株呼吸和土壤呼吸的温度敏感性的影响,应用静态箱-气相色谱法,于2008年春进行田间试验,观测UV-B辐射增强20%处理以及对照(CK)的麦田生态系统呼吸和土壤呼吸的日变化规律,同时观测温度、湿度等环境因子.结果表明,UV-B辐射增强明显抑制了拔节-孕穗期间麦田生态系统呼吸和土壤呼吸作用,且对土壤呼吸的抑制作用大于对生态系统呼吸的抑制作用,在5次测定中,CK比UV-B处理的日平均生态系统呼吸速率高9%、9%、3%、16%和30%,CK比UV-B处理的日平均土壤呼吸速率分别高99%、93%、106%、38%和10%.CK和UV-B处理植株呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 分别为1.79和1.59,土壤呼吸的 Q_{10} 分别为1.38和1.76,而生态系统呼吸的 Q_{10} 则分别为1.65和1.63. UV-B辐射增强导致小麦植株呼吸的温度敏感性降低(Q_{10} 值减小),而土壤呼吸的温度敏感性增强(Q_{10} 值增大),但UV-B辐射增强对麦田生态系统呼吸的温度敏感性没有明显影响.

关键词: UV-B; 植株; 土壤; 呼吸; 温度敏感性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1249-06

Temperature Sensitivity of Wheat Plant Respiration and Soil Respiration Influenced by Increased UV-B Radiation from Elongation to Flowering Periods

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

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

Abstract: Field experiment was carried out in the spring of 2008 in order to investigate the effects of increased UV-B radiation on the temperature sensitivity of wheat plant respiration and soil respiration from elongation to flowering periods. Static chamber-gas chromatography method was used to measure ecosystem respiration and soil respiration under 20% UV-B radiation increase and control. Environmental factors such as temperature and moisture were also measured. Results indicated that supplemental UV-B radiation inhibited the ecosystem respiration and soil respiration from wheat elongation to flowering periods, and the inhibition effect was more obvious for soil respiration than for ecosystem respiration. Ecosystem respiration rates, on daily average, were 9%, 9%, 3%, 16% and 30% higher for control than for UV-B treatment for the five measurement days, while soil respiration rates were 99%, 93%, 106%, 38% and 10% higher for control than for UV-B treatment. The Q_{10} s (temperature sensitivity coefficients) for plant respiration under control and UV-B treatments were 1.79 and 1.59, respectively, while the Q_{10} s for soil respiration were 1.38 and 1.76, respectively. The Q_{10} s for ecosystem respiration were 1.65 and 1.63 under CK and UV-B treatments, respectively. Supplemental UV-B radiation caused a lower Q_{10} for plant respiration and a higher Q_{10} for soil respiration, although no significant effect of supplemental UV-B radiation on the Q_{10} for ecosystem respiration was found.

Key words: UV-B; plant; soil; respiration; temperature sensitivity

温室效应所引起的全球变暖问题已经引起了人们的广泛关注,CO₂是最主要的温室气体,近几十年来其在大气中的浓度持续上升.同时,由于大气中氟氯烃等化学物质含量增加,造成了平流层臭氧浓度的降低,这直接导致到达地表的紫外(UV-B)辐射增强^[1].

大量研究表明UV-B辐射增强对农田生态系统有重要的影响.UV-B增强会降低作物的光合速率,影响作物生理生长活动^[2~5],UV-B增强也会对土壤微生物的群落及活性产生影响^[6,7].此外,在UV-B辐射增强条件下,农田的生态系统呼吸速率和N₂O排放通量也会显著降低^[8,9].

作物植株呼吸和土壤呼吸是农田生态系统中CO₂排放的主要形式,众多环境因子中,温度是影响呼吸作用的最关键因子^[10].通常呼吸与温度的关系可用温度系数 Q_{10} (温度每增加10℃呼吸作用所增加的倍数)来描述^[11].以往的研究中,虽然人们对UV-B辐射增强条件下农田的生态系统呼吸速率进行了一些观测试验,但尚未对UV-B辐射增强后作物植株呼吸和土壤呼吸温度敏感性的变化规律进行研

收稿日期: 2008-06-29; 修订日期: 2008-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(40605029, 40431001); 中国博士后科学基金项目(20080420195); 南京信息工程大学科研基金项目(S810733901)

作者简介: 陈书涛(1978~),男,博士,讲师,主要研究方向为温室气体排放与全球变化, E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn

究^[12].

本研究试图通过田间观测试验,分析UV-B辐射增强对作物植株和土壤呼吸的温度敏感性的影响,以期评估未来全球变化背景下农田生态系统碳排放通量的变异规律提供基本理论支撑和参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

于2008年春在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)进行小麦生长季田间观测试验.当地多年平均降水为每年1 100 mm,多年平均温度为15.6℃.土壤为潞育型水稻土,灰马肝土属,耕层土壤质地为壤质黏土,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 g·kg⁻¹、11.5 g·kg⁻¹.

1.2 试验设计

供试小麦品种为扬麦12号,于2007-11-12播种,2007-11-24出苗.于冬小麦返青期(2008-02-24)开始进行UV-B辐射增强处理,直至小麦收获,每天辐照时间为08:00~16:00,遇有阴雨天则停止辐照.采用人工增加紫外辐射的方法,将UV-B灯管(40 W,峰值313 nm,上海华德电光源厂生产)悬挂于作物上方,用于模拟UV-B辐射增强.

试验设对照(CK)与UV-B辐射增强处理(UV-B).本研究将UV-B增强幅度设为20%,采用UV-B监测装置(SKU430,光谱范围:280~315 nm,英国Skye公司)和自动数字采集器(Skye-Datalog, Skye公司)自动记录CK和UV-B处理的UV-B量值,并通过调节灯管高度和电流输出强度保证UV-B处理比CK处理的UV-B辐射强度高20%.UV-B处理与CK处理均悬挂UV-B灯管,对照的灯管外包裹有Mylar膜(厚度125 μm,美国杜邦公司),以滤掉320 nm以下的波段,这样可保证UV-B处理与CK处理相比仅仅是UV-B增强20%,而其它环境条件(自然光、少许UV-A,等)相同^[9].

1.3 气体样品采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定麦田生态系统呼吸和土壤呼吸.在田间设置圆形采样底座,底座直径为25 cm.测定生态系统呼吸作用的底座内保留小麦植株,其量值包含了植株呼吸和土壤呼吸;在小麦植株之间设置测定土壤呼吸的底座,在整个生长阶段底座内无小麦地上部分植株,其量值不包含植株呼吸部分,而底座周边的小麦植株的根系可通过底座下边缘伸入到底座内,所测定的土壤呼吸作用为土

壤异养呼吸和根呼吸之和.生态系统呼吸和土壤呼吸的测定均设置3次重复.于2008-03-17、2008-03-28、2008-04-07、2008-04-14、2008-04-28进行5次呼吸作用日变化测定,由于UV-B辐射仅出现在有光照的条件下,因此呼吸作用日变化的测定设定在08:00~18:00之间.

采样箱高度为1 m,由PVC管和遮光隔热材料制成.采集气体样品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,样品量50 mL,当天将采集的气样在实验室用Agilent 6890D气相色谱仪分析CO₂浓度.色谱仪器所用载气为99.999%高纯氮.色谱分离柱为不锈钢柱,其填料为Porapak Q,工作时柱温55℃.CO₂在镍触媒催化下转化为CH₄,继而以FID检测器测定,检测温度200℃,以HP软件分析求得气体的浓度^[13].通过对每组3个样品的CO₂浓度与相对应的采样间隔时间进行直线回归,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、CO₂分子量等,求得单位面积的CO₂排放量^[14],即生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率.

1.4 环境因子测定

每次进行气体样品采集的同时测定空气温度、土壤温度、土壤湿度等环境因子指标.

2 结果与分析

2.1 生态系统呼吸和土壤呼吸的日变化

03-17、03-28、04-07、04-14、04-28共5次的测定结果表明,CK和UV-B处理的小麦-土壤系统呼吸作用均呈现单峰变化的规律,即12:00或14:00时的呼吸速率最高,08:00和18:00时的呼吸速率相对较低(图1).在5个采样日,CK的生态系统呼吸速率普遍高于UV-B处理.将每个采样日6个采样时间点测定的生态系统呼吸取算术均值,可得03-17、03-28、04-07、04-14、04-28 CK的生态系统呼吸速率分别为768.5、880.2、1 317.5、1 379.0和1 375.3 mg·(m²·h)⁻¹,而UV-B处理的生态系统呼吸速率分别为707.9、807.2、1 277.7、1 190.2和1 058.6 mg·(m²·h)⁻¹,可见,5次采样中,CK比UV-B处理的平均生态系统呼吸速率分别高9%、9%、3%、16%和30%,UV-B辐射抑制了麦田的生态系统呼吸作用.

与麦田生态系统呼吸作用相类似,CK和UV-B处理的麦田土壤呼吸作用也呈现单峰变化的规律.

在 5 个采样日, CK 的土壤呼吸速率也普遍高于 UV-B 处理, 但 UV-B 辐射对麦田土壤呼吸的抑制作用比对生态系统呼吸的抑制作用更加明显, 5 次采样中, CK 比 UV-B 处理的土壤呼吸速率分别高 99%、93%、106%、38% 和 10%, 在前 3 次的测定中, CK 约是 UV-B 处理的土壤呼吸速率的 1 倍。

进一步分析可见, 对照(CK)的日平均土壤呼吸速率(根据每天 6 次的测定结果计算算术均值)占日

平均生态系统呼吸速率的比例总体上高于 UV-B 处理(图 2), 特别是在 03-17、03-28 和 04-07 这 3 个采样日, CK 比 UV-B 处理大约高 17%。若以 5 个采样日的日平均呼吸速率再取平均值, 可得 CK 和 UV-B 处理的土壤呼吸速率占生态系统呼吸速率的比例分别为 32.4% 和 22.2%。这说明在作物旺盛生长的拔节-孕穗阶段 UV-B 辐射对土壤呼吸的抑制作用大于对生态系统呼吸的抑制作用。

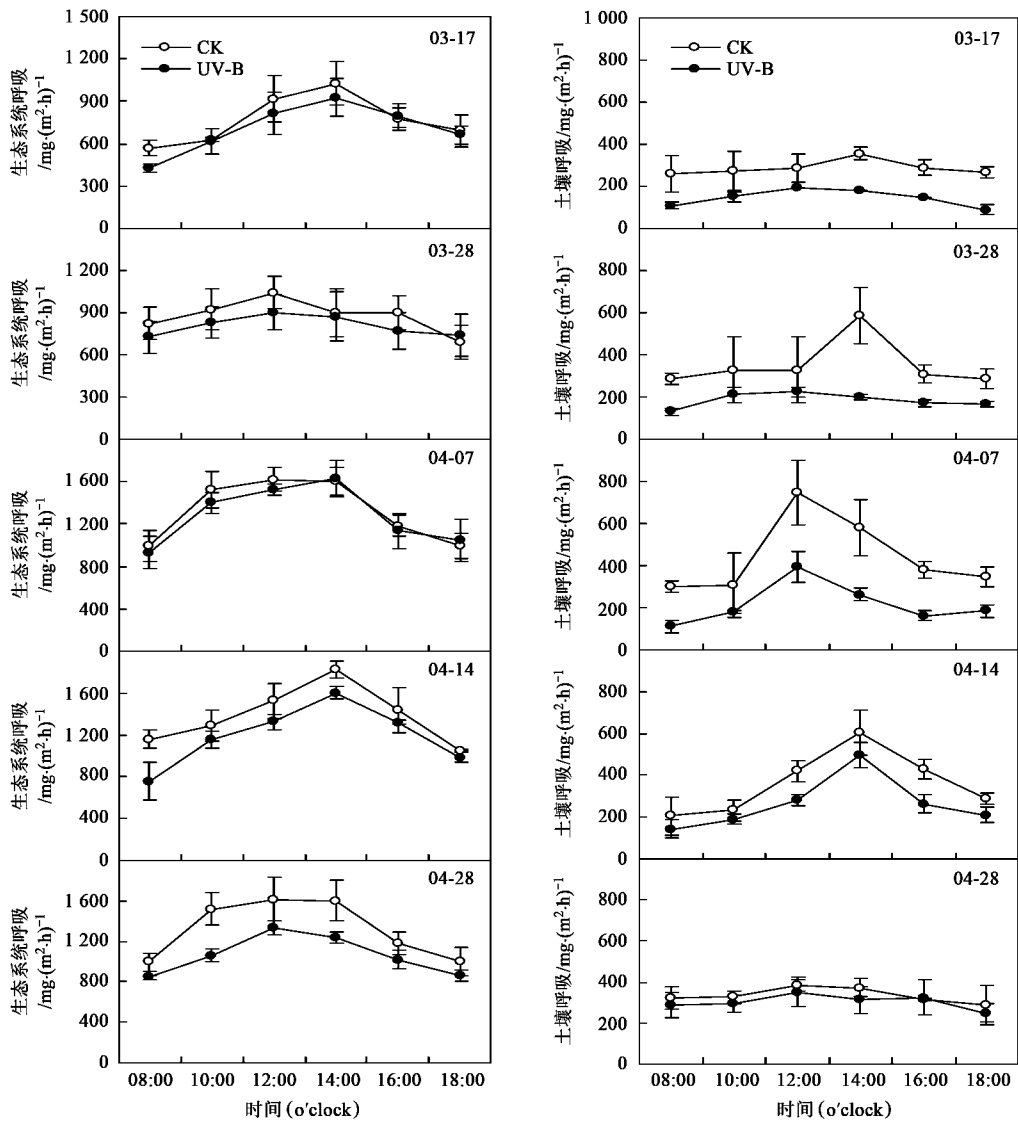


图 1 生态系统呼吸和土壤呼吸的时间变化
Fig.1 Temporal variations in ecosystem and soil respiration

2.2 植株和土壤呼吸的温度敏感性

由于本试验测得的土壤呼吸为土壤异养呼吸(土壤微生物呼吸)和根呼吸之和, 因此, 将生态系统呼吸速率减去土壤呼吸速率, 其差值即为小麦地上部分植株的呼吸速率。将对照(CK)和 UV-B 处理的植

株呼吸分别与其对应的空气温度进行一元指数回归拟合, 结果表明, CK 和 UV-B 处理的植株呼吸与气温之间的关系均可用指数方程来描述(图 3)。对于 CK 和 UV-B 处理而言, 拟合方程的可决系数 R^2 分别为 0.539 和 0.564, 其对应的 p 值均小于 0.001。然而,

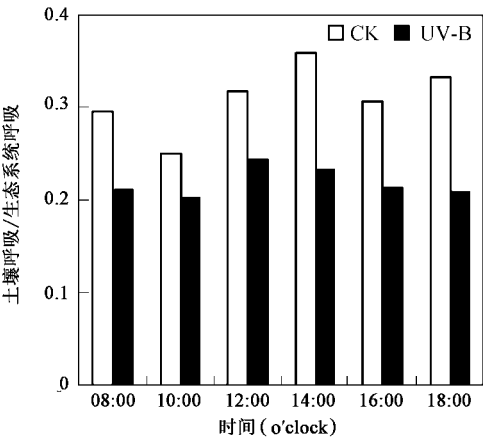
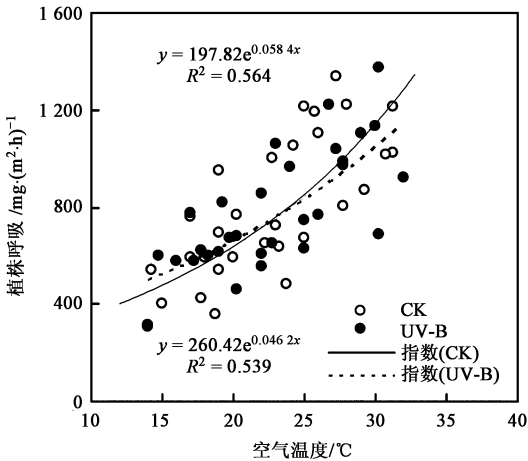


图2 不同采样日的日平均土壤呼吸速率占日平均生态系统呼吸速率的比例

Fig.2 Ratio of daily mean soil respiration rate to daily mean ecosystem respiration rate on different sampling dates



根据指数方程计算得到的 CK 和UV-B处理的 Q_{10} 值却有所差异,二者分别为 1.79 和 1.59,前者比后者高 0.20,这表明UV-B辐射处理后,拔节-孕穗期间小麦植株呼吸对温度的敏感性有所降低.

将对照(CK)和UV-B处理的土壤呼吸分别与其对应的土壤温度进行一元指数回归拟合,结果表明,CK 和UV-B处理的土壤呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程来描述(图3).对于 CK 和UV-B处理而言,拟合方程的可决系数 R^2 分别为 0.293 和 0.439,其对应的 p 值分别为 0.002 和 < 0.001 . 与植株呼吸不同的是,UV-B辐射增强条件下土壤呼吸的温度敏感性明显增强,CK 和UV-B辐射处理的 Q_{10} 值分别为 1.38 和 1.76,前者比后者低 0.38,这表明在UV-B辐射增强条件下,拔节-孕穗期间麦田土壤呼吸对温度增加的响应更加明显.

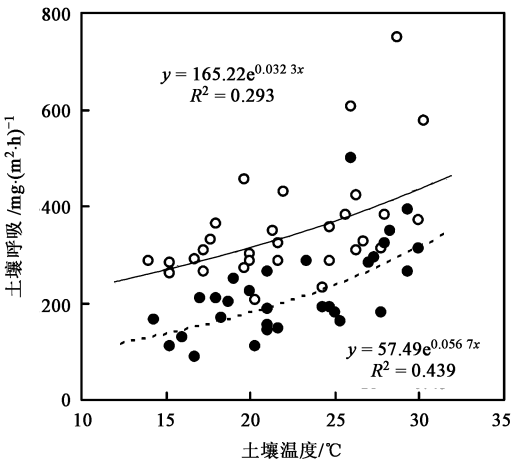


图3 小麦植株呼吸与气温的关系及土壤呼吸与土温的关系

Fig.3 Relationship between wheat plant respiration and air temperature, and between soil respiration and soil temperature

此外,进一步分析可见,在不受UV-B胁迫的正常条件下,植株呼吸和土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 1.79 和 1.38,两者差异较大,且植株呼吸对温度的敏感性明显高于土壤;而在UV-B辐射增强条件下,植株呼吸和土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 1.59 和 1.76,两者差异相对较小,土壤呼吸的 Q_{10} 值略高于植株呼吸的 Q_{10} 值.这表明拔节-孕穗期间麦田UV-B辐射增强导致小麦植株和土壤呼吸的温度敏感性趋于接近,二者的温度敏感系数 Q_{10} 的差异减小.

由于UV-B辐射增强导致植株呼吸的温度敏感性降低,而土壤呼吸的温度敏感性有所增强,2种效应的叠加使得小麦-土壤的生态系统呼吸的温度敏感性基本保持不变(图4),根据图4的一元指数拟

合方程计算得到的 CK 和UV-B处理的 Q_{10} 值分别为 1.65 和 1.63.

3 讨论

3.1 UV-B辐射增强对麦田呼吸作用的影响

本课题组以往的田间观测试验和室内盆栽试验均表明,UV-B辐射增强会显著抑制拔节-孕穗期小麦-土壤系统的呼吸速率^[8,9,15],同时UV-B辐射增强处理下小麦植株的呼吸作用也明显低于正常UV-B照射情况下的量值^[16],但是,在小麦返青期和成熟期,处理和对照之间生态系统呼吸速率的差异则不明显,这说明拔节-孕穗期这一小麦生长比较旺盛的阶段恰是小麦对UV-B辐射比较敏感的时期,这与本研究结果一致.拔节-孕穗期是营养生长和生殖生长并

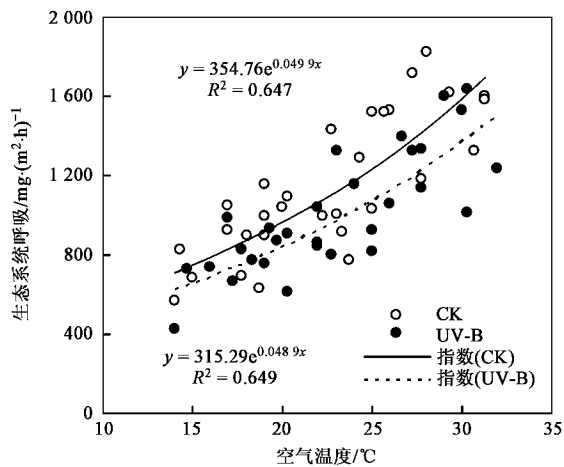


图4 麦田生态系统呼吸与气温的关系

Fig.4 Relationship between ecosystem respiration and air temperature in the wheat-planted farmland

重阶段,此时小麦在叶片中产生碳水化合物并将其大部分贮存于叶片中,对UV-B响应较为敏感^[15,17]。

土壤呼吸主要由根系呼吸、根际共生体的呼吸,土壤微生物呼吸3个部分组成^[18,19],本研究中测定的土壤呼吸即包含了这3个部分,其中,前两者的大小主要与植物根系有关,也称为根驱动的呼吸^[18],根系生物量、根系活性、植株光合产物向地下输送的速度共同决定着根驱动的呼吸的量值^[18,20,21]。小麦根呼吸占土壤呼吸的比例随小麦生长节律的不同而有所差异^[22],且随着小麦种植密度的增大而增大^[23],而根呼吸系数则随根氮含量和土壤水分含量的增加而增加^[23-25]。以往的大量实验证明,UV-B辐射增强会导致植物生物量的显著减少^[3,5],植物根系分泌物在UV-B辐射增强条件下也会显著减少^[26],这必将导致植物根驱动的呼吸速率的下降,甚至可能影响根呼吸在土壤呼吸中所占的比例;同时,UV-B辐射增强也会减少土壤中某些种类微生物(如亚硝酸细菌)的数量^[6],UV-B对植物和土壤微生物的影响可能是导致土壤呼吸作用下降的重要原因。

3.2 UV-B辐射增强与 Q₁₀

植物呼吸和土壤呼吸的温度敏感系数是表征呼吸作用的重要指标,这一指标也反映了温度变化后,呼吸作用的变化规律,对于了解未来气候变暖条件下生态系统中碳排放通量的变异规律具有一定的参考意义。本研究表明,UV-B辐射增强后,拔节-孕穗期间小麦植株呼吸的温度敏感性降低(Q₁₀值减小),而土壤呼吸的温度敏感性增强(Q₁₀值升高)。综合前人的研究,笔者推断可能有如下3个方面的原因:第

一,小麦植株和土壤微生物对于UV-B辐射胁迫表现出不同的生理生态效应,在逆境胁迫下,植株对温度升高的响应减弱,而微生物对温度升高的响应增强。第二,UV-B直接辐射到作物叶片,这对其光合系统和呼吸系统造成较大损害^[16],由于组织结构受破坏较大,升温所导致的呼吸代谢的增加量也小于正常环境条件下的增加量;而UV-B辐射对土壤的穿透能力较弱,反而可能对某些类群微生物的活性具有激发作用,例如,有研究表明,UV-B辐射增强降低春小麦根际土壤细菌总数,但对真菌的影响较小^[6],从而导致土壤微生物碳氮比的升高(细菌的碳氮比在4~5:1,而真菌的碳氮比为9~10:1)^[27],因此,UV-B辐射可能改变了土壤微生物类群组成。如果受UV-B辐射增强影响比较小的那些微生物类群对温度响应比较敏感,则可能导致土壤呼吸的Q₁₀值也相应增大。第三,有研究表明,UV-B辐射增强条件下,小麦根区土壤的微生物碳和微生物氮的量有明显增加^[8],这可能也导致了土壤微生物在温度升高时对碳、氮营养源的分解能力加强。

在未来全球变暖和UV-B辐射增强条件下,如果植物呼吸的温度敏感性减弱,那么通过植物呼吸排放的碳的增量可能会小于升温所导致的植物生物量的增量;同时,如果土壤呼吸的温度敏感性增强,那么通过土壤呼吸排放的CO₂量则会超过人们所预测的单纯增温条件下土壤CO₂的排放量。这就有可能使得生态系统中的碳贮存于植物体内的量增加而贮存于土壤中的量减少。正是由于UV-B增强对于呼吸作用温度敏感性的影响的不一致性和复杂性,使得今后在这方面的继续研究显得很有必要。

本研究主要进行了UV-B辐射增强对麦田生态系统昼间呼吸作用影响研究,而未测定夜间的呼吸作用。虽然采用暗箱法测定呼吸作用时保证了植物和土壤处于黑暗条件下,但这种短期黑暗条件下的呼吸作用测定结果与夜间完全处于生物暗适应条件下的结果可能存在一定差异,同时由于白天UV-B辐射增强的影响效应可能会持续到夜间,所以,UV-B辐射增强对夜间呼吸作用的影响趋势无法通过本研究所确定。今后有必要进行土壤呼吸和生态系统呼吸的昼夜连续测定,并进一步分析UV-B辐射对呼吸作用的影响在白天和夜间是否有差异。

另外,由于以往UV-B辐射对植物和土壤呼吸的温度敏感性的研究相对较少,本试验也仅仅对特定作物进行了观测,因此,UV-B胁迫条件下植物和土壤呼吸的温度敏感性所表现出来的差异是否具有普

遍性还不能确定,这还有待大量观测资料的证明,并从机制上进行深入研究.

4 结 论

(1)UV-B辐射增强显著抑制了拔节-孕穗期麦田的生态系统呼吸作用,且UV-B辐射增强对土壤呼吸的抑制作用大于对生态系统呼吸的抑制作用.

(2)UV-B辐射增强后,拔节-孕穗期间小麦植株呼吸的温度敏感性降低(Q_{10} 值减小),而土壤呼吸的温度敏感性增强(Q_{10} 值增大).

(3)UV-B辐射增强导致小麦植株和土壤呼吸的温度敏感性趋于接近,二者的温度敏感系数 Q_{10} 的差异减小.

(4)UV-B辐射增强对麦田生态系统呼吸的温度敏感性没有明显影响.

致谢:感谢南京信息工程大学环境科学与工程学院的豆书红、刘佳树、曾亦明在气体样品采集和分析中给予的帮助.

参考文献:

[1] Randel W J, Stolarski R S, Cunnold D M, *et al.* Trends in the vertical distribution of ozone [J]. *Science*, 1999, **285**: 1689-1692.

[2] 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.

[3] Li Y, Zu Y Q, Chen J J, *et al.* Intraspecific responses in crop growth and yield of 20 soybean cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions [J]. *Field Crops Research*, 2002, **78** (1): 1-8.

[4] Reddy K R, Kakani V G, Zhao D, *et al.* Cotton responses to ultraviolet-B radiation: experimentation and algorithm development [J]. *Agric For Meteorol*, 2003, **120**: 249-266.

[5] Zheng Y F, Gao W, Slusser J R, *et al.* Yield and yield formation of field winter wheat in response to supplemental solar ultraviolet-B radiation [J]. *Agric For Meteorol*, 2003, **120**: 279-283.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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 N_2O 排放的影响机理研究[J]. *环境科学*, 2006, **27** (9): 1712-1716.

[9] 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 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 449-454.

[10] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Funct Ecol*, 1994, **8**(3): 315-323.

[11] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**(2): 155-165.

[12] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Modeling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q_{10} [J]. *Global Change Biol*, 2006, **7**: 223-230.

[13] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, **20**(5): 842-844.

[14] 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. 81-83.

[15] 牛传坡,蒋静艳,黄耀. UV-B辐射强度变化对冬小麦碳氮代谢的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1327-1332.

[16] 田向军,邱宗波,刘晓,等. 增强UV-B辐射对小麦叶片黄酮类化合物日变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(3): 516-521.

[17] Zhao D L, Reddy K R, Kakani V G, *et al.* Leaf and canopy photosynthetic characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum*) under elevated CO_2 concentration and UV-B radiation [J]. *J Plant Physiol*, 2004, **161**(5): 581-590.

[18] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**(3): 425-448.

[19] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, **411**: 789-792.

[20] Kuzyakov Y, Larionova A A. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration of autotrophic and heterotrophic organisms in soil [J]. *J Plant Nutr Soil Sc*, 2005, **168** (4): 503-520.

[21] 刘巧辉,黄耀,郑循华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1105-1111.

[22] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**(14): 1915-1925.

[23] 陈书涛,古敏,贾刘敏,等. 冬小麦返青-拔节期土壤的自养和异养呼吸研究[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(5): 937-944.

[24] 孙文娟,黄耀,陈书涛,等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响[J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 1-6.

[25] 孙文娟,黄耀,陈书涛,等. 稻麦作物呼吸作用与植株氮含量、生物量和温度的定量关系[J]. *生态学报*, 2005, **25**(5): 1152-1158.

[26] Rinnan R, Gehrke C, Michelsen A. Two mire species respond differently to enhanced ultraviolet-B radiation: effects on biomass allocation and root exudation [J]. *New Phytol*, 2006, **169**(4): 809-818.

[27] 陈文新. 土壤和环境微生物学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1989. 73.