

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

蒋静艳¹, 牛传坡¹, 胡正华³, 杨玉峰¹, 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, 南京 210044)

摘要: 为了解 UV-B 增强条件下农田 N₂O 响应规律, 采用室外盆栽实验, 研究了地表 UV-B 辐射增强 20% 对土壤-冬小麦系统 N₂O 排放的影响及其影响机理。结果表明, 在小麦返青期, UV-B 辐射增强处理对该系统 N₂O 的排放影响不显著; 在小麦的拔节期, UV-B 辐射增强处理显著降低了土壤-小麦系统 N₂O 的排放, 并减少了该系统的呼吸速率。UV-B 辐射增强对 N₂O 的影响机理主要表现在对小麦植株 N 代谢过程的影响, 如显著增加了植株叶片中可溶性蛋白质、TN、TP 的含量。UV-B 辐射增强对土壤产 N₂O 的影响表现为间接影响, 主要是显著增加了小麦根区土壤有效氮和土壤微生物碳、氮的量, 并改变了土壤微生物的 C/N, 使之由 5.0 增至 6.8。

关键词: UV-B; 土壤-小麦系统; N₂O 排放; N 代谢

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1712-05

Study on Mechanism of Enhanced UV-B Radiation Influencing on N₂O Emission from Soil-Winter Wheat System

JIANG Jing-yan¹, NIU Chuan-po¹, HU Zheng-hua³, YANG Yu-feng¹, 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. Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To study the influencing mechanisms of enhanced UV-B radiation on the emission of N₂O from soil-wheat system, outdoor pot experiments with simulating 20% supplemental level of UV-B were conducted. Results indicate that the enhanced UV-B had no significant impact on the emission of N₂O from soil-wheat system in turning-green stage, but declined the N₂O flux and the rate of the system's respiration in elongation stage. The impact mechanisms of enhanced UV-B radiation on the N₂O flux were to directly change the nitrogen metabolism process of wheat plant, such as significantly increasing soluble protein, total nitrogen and total phosphorus in wheat leaves. But the effects of UV-B radiation on soil N₂O emission may be indirect, namely, UV-B treatment by working on wheat plant significantly increased the soil available nitrogen, soil microbial biomass C and N, and also changed the ratio of soil microbial C: N (from 5.0 to 6.8) in winter-wheat rhizosphere.

Key words: UV-B; soil-wheat ecosystem; N₂O flux; nitrogen metabolism

全球变暖和臭氧层破坏是当今重要的环境问题。N₂O 作为重要的温室气体之一, 其百年尺度摩尔增温潜势(global warming potential, GWP) 为 CO₂ 的 296 倍, 在过去的 250a 内, 其浓度增加了 17%, 且在未来 100a 依然呈增加趋势^[1]。此外, N₂O 在大气中的滞留时间可达 120a 之久, 并参与大气中许多光化学反应, 导致平流层中的臭氧层间接受到破坏^[2]。

近年来, 平流层臭氧浓度的降低直接导致到达地表的太阳紫外 UV-B 辐射增强, 有报告指出, 目前大气臭氧层的破坏, 使得到达地表的太阳紫外辐射比 1980 年前增加了 6%~14%^[3], 且在今后几十年内, 地表紫外辐射仍将持续增强^[4]。

大量研究已表明, UV-B 增强降低作物的光合作用, 影响作物形态结构及生长发育^[5~7], 使作物的株高、生物量和产量均显著下降^[5,8,9], 并对陆地生态系统土壤微生物的群落及活性产生影响^[10~13]。除此之外, Ghisi 等人的研究还指出 UV-B 增强影响了大麦的氮代谢, 表现为硝酸还原酶活性降低^[14]。

农田生态系统是 N₂O 的重要排放源, 农田土壤

收稿日期: 2005-10-30; 修订日期: 2005-12-27

基金项目: 南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ04007); 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基金项目(LAPC-KF-2004-03)

作者简介: 蒋静艳(1972~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为农田温室气体与全球变化, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

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

N_2O 的产生主要来自于土壤微生物的硝化-反硝化过程^[15]. 植物一方面作为农田 N_2O 排放的主要通道, 另一方面自身可通过生理代谢过程产生并排放 N_2O , 其可能的代谢途径见文献[16, 17].

关于 UV-B 辐射增强是否会通过影响植物和土壤微生物的生理过程进而影响农田的 N_2O 产生与排放尚未见报道, 本研究是在模拟 UV-B 辐射增强条件下, 探讨 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N_2O 产生中间过程的影响, 旨在为未来在 UV-B 辐射增强情景下了解农田 N_2O 排放及变化趋势提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究采用室外盆栽实验, 供试土壤采自江苏省南京市盘城镇郊区, 土壤为潴育型水稻土, 灰马肝土属, 耕层土壤质地为壤质粘土, 粘粒含量为 26.1%. 土壤 $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ 值为 6.22, 有机碳、TN 的含量分别为 19.4g/kg, 1.45g/kg; 作物品种为扬麦 158.

1.2 实验方法

1.2.1 UV-B 辐射强度设计

采用人为增加紫外辐射的方法, 将 UV-B 灯管悬于作物上方, 用于模拟 UV-B 辐射增强. 所采用的 UV-B 灯管是上海华德电光源厂生产(40W, 峰值 313nm), 大部分属 UV-B 光谱(280~320nm), 有少量 UV-A 和 PAR, 并安装电流控制器(可以控制 UV-B 灯管的紫外辐射输出).

试验设对照(CK), 处理(T)2 个小区. T 是指在自然光照的基础上增加 UV-B 辐射 20% (指日均 UV-B 辐照强度比自然光增加 20%), 对照小区灯管用 Mylar 膜(美国杜邦公司生产, 厚度 125 μm) 滤掉 320nm 以下波段, 即对照组灯管滤后无 UV-B 输出, 保证处理与对照相比仅 UV-B 增强 20%, 而其它环境条件(自然光加少许 UV-A 和 PAR) 相同.

1.2.2 测定方法

小麦播种时间为 2004-11-19, 于当月 30 日左右齐苗, 每盆定苗 10 株. 从 2005-02-19 开始 UV-B 辐照, 每天辐照时间从 08:00~16:00, 共 8h, 阴雨天停止照射. UV-B 背景强度与灯管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 310nm), 每天分不同时段测定, 计算其日均 UV-B 辐射量, 然后定期调整灯管高度, 使处理比对照的 UV-B 辐射日均增强 20%. 分别于返青期(2005-03-14) 和拔节

期(2005-04-07) 采集土壤-小麦系统气体样品, 小麦植株和小麦根区土壤, 每次采样 3 重复.

(1) 土壤小麦系统 CO_2 和 N_2O 排放观测 气体采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[18]. 气体样品用带有三通阀开关的针筒采集, 样品量为 30mL. 所采气样用经改装的 Agilent-4890D 气相色谱仪同步检测 CO_2 和 N_2O 的浓度.

(2) 相关项目的测定方法 与产 N_2O 相关的根际土壤微生物计数如亚硝酸菌、反硝化菌的测定: 采用 MPN 法; 土壤微生物 C 或 N 的测定: 采用氯仿熏蒸直接浸提法; 土壤中硝化反硝化作用底物 NH_4^+-N , NO_3^--N 的测定: CaCl_2 浸提, 流动分析仪(型号: AA-3) 分析; 小麦叶片中 NO_3^--N 的测定: 硝基水杨酸比色法; 小麦叶片中可溶性蛋白质及硝酸还原酶(NR) 活性测定: 参照文献[19]; 植株中全 N 的测定: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 纳氏比色法; 植株中全磷的测定: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 钼锑抗比色法.

2 结果与分析

2.1 地表 UV-B 辐射增强对土壤-植物系统 N_2O 排放的影响

图 1 结果表明, 在返青期(03-14 采样), UV-B 辐照处理与对照相比, N_2O 的排放通量没有显著差异($p = 0.7521$); 而到了拔节期(04-07 采样) UV-B 辐照处理降低了土壤小麦系统的 N_2O 排放通量. 方差分析表明, 处理与对照之间 N_2O 排放差异达显著水平($p = 0.02486$), 处理 N_2O 的排放通量只占对照的 75.6%. CO_2 排放通量反映了系统内生物的呼吸速率. 图 2 显示小麦返青期和拔节期 2 次采样 CO_2 排放规律与 N_2O 排放趋势一致. 方差分析结果同样表明, 返青期处理与对照 CO_2 排放通量无差异($p = 0.9701$), 而拔节期处理与对照之间 CO_2 排放通量差异在 0.1 水平有差异($p = 0.06166$), 处理 CO_2 的排放通量较对照相比减少了 18.9%. 2 次采样结果不同的原因可能是短时间(02-19~03-14 有效辐射时间共 20d) 的 UV-B 辐射或其它环境因子如水分、温度等因素的协同影响导致第 1 次采样时 UV-B 辐照处理未能影响系统 N_2O 排放, 而经过较长时间(02-19~04-07 有效辐射时间共计 38d) 的 UV-B 辐照以及随着气温的回升、小麦生长速率的加快, UV-B 辐照处理既影响了该系统内生物的生理代谢过程(呼吸速率降低), 也影响了该系统内 N_2O 的排放. 王传海等报道过小麦拔节至孕穗期是

小麦对 UV-B 增加响应最敏感的时期^[20], 本研究结果也说明拔节期冬小麦对 UV-B 增加有明显响应, 与其存有一致性.

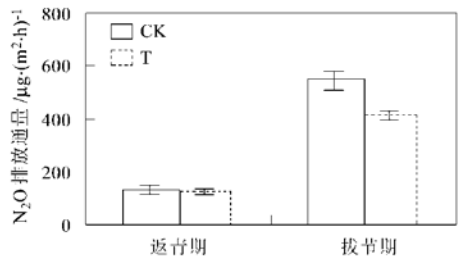


图 1 UV-B 辐照增强对 N₂O 排放通量的影响
Fig. 1 Effects of enhanced UV-B radiation on N₂O flux

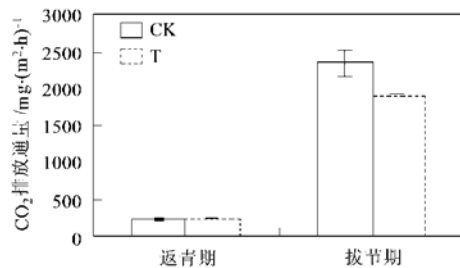


图 2 UV-B 辐照增强对 CO₂ 排放通量的影响
Fig. 2 Effects of enhanced UV-B radiation on CO₂ flux

2.2 UV-B 辐射增强对小麦生长的影响
2.2.1 地表 UV-B 辐射增强对小麦生物量的影响
从表 1 可以看出, 返青期, 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差异不显著(p 分别为 0.693 3, 0.822 3, 0.726 8); 拔节期, 虽然处理 T 与对照 CK 相比, 根干重差异不显著

($p = 0.167\ 4$), 但 UV-B 辐射增强对小麦地上部分干重影响差异显著($p = 0.037\ 42$), 使地上部分干重减少了 24.9%. 这可能是由于返青期是小麦幼苗生长的早期阶段, 植株幼小, 其总生物量只有拔节期的 7.8%~11.6%, 温度较低, N₂O 的释放量较小, 植株生长缓慢, 光合速率较低, UV-B 辐照时间较短, 其对幼苗影响尚未在生物量上反映出来. 随着 UV-B 辐射时间的增加以及气温的回升, 植物生长迅速, 植物产生的 N₂O 释放量增多, UV-B 辐射对植物的光合作用产生影响, 最终影响其生物量. 这与大多数报道结果相一致^[5~9].

2.2.2 地表 UV-B 辐射增强对植株 N 代谢过程的影响

李^[21]莹等的研究发现, 植物 N₂O 的排放与植物叶片中的硝酸还原酶活性和 NO₃⁻-N 含量显著正相关^[21]. 而从表 2 可以看出, 返青时的对照与处理 2 组小麦中的硝酸还原酶活性及 NO₃⁻-N 的量很接近, 差异不显著(p 分别为 0.929 1 和 0.812 7); 拔节时, 处理与对照小麦中的硝酸还原酶活性及 NO₃⁻-N 的量差异也不显著(p 分别为 0.431 0 和 0.154 2), 但 p 值均较返青期降低了. 从均值水平而言, UV-B 辐射处理过的小麦硝酸还原酶活性仅是对照的 30.0%, NO₃⁻-N 数量则略有上升, 是对照的 1.2 倍, 这与 Ghisi 等^[14]的研究结果基本一致.

表 2 还表明, 地表 UV-B 辐射增强对返青期小麦中的蛋白质含量影响不显著($p = 0.165\ 6$), 但到了拔节期, 地表 UV-B 辐射增强对其影响差异显著($p = 0.042\ 84$), 小麦中的蛋白质含量增加了 30.9%. 可能的原因是 UV-B 影响了硝酸还原酶的

表 1 地表 UV-B 辐射增强对小麦生物量的影响¹⁾/g

Table 1 Effects of enhanced UV-B on dry matter yield of winter wheat in turning-green stages and elongation stages/g

生物量	返青期		拔节期	
	CK	T	CK	T
根干重	0.57(0.08)	0.66(0.20)	8.49(1.67)	5.49(0.61)
地上部分干重	1.51(0.19)	1.57(0.13)	18.23(1.12)	13.70(0.96)*
总生物量	2.08(0.21)	2.22(0.32)	26.72(2.53)	19.19(1.56)

1) 所有数值表示为均值, 括号内数据为标准误差, * 表示处理与对照在 0.05 水平上有显著差异, ** 表示处理与对照在 0.01 水平上有极显著差异($n = 3$), 下同

表 2 地表 UV-B 辐射增强对小麦叶片硝态氮、硝酸还原酶活性和可溶性蛋白质的影响

Table 2 Effects of enhanced UV-B on concentrations of NO₃⁻-N, nitrate reductase activities and soluble proteins in leaves of winter wheat

N 代谢物	返青期		拔节期	
	CK	T	CK	T
硝态氮/mg·kg ⁻¹	348.6(20.2)	361.4(46.7)	161.3(8.8)	190.4(14.1)
硝酸还原酶活性/U·(min·mg) ⁻¹	0.086(0.019)	0.090(0.041)	0.070(0.053)	0.021(0.020)
蛋白质/g·kg ⁻¹	29.3(2.7)	24.6(0.5)	33.6(1.5)	44.0(3.2)*

活性,从而使得叶片中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的转化过程受阻, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 有所积累,并且在植物 N 代谢途径^[15]中植株叶片里的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 大部分是经同化还原成 NH_3 并进一步合成氨基酸,使得蛋白质含量增加,与此同时异化还原生成的 N_2O 量降低,排放量也随之降低。

表 3 显示,在小麦返青期,与对照相比,UV-B 辐射增强对小麦植株中的 TN、TP 影响不显著(p 分别为 0.238 5 和 0.723 6)。但到了拔节期,UV-B 辐射增强对小麦茎和叶中的 TN、TP 皆有影响,有的达极显著水平。与对照相比,处理茎和叶中的 TN 分别增加了 22.7% 和 9.7%,TP 分别增加了 26.0% 和 17.7%。从表中还可看出 UV-B 辐射增强对小麦叶片中的 TP 影响更为明显。TN、TP 与 N 代谢过程是密切相关的,但是 TN、TP 与植株 N_2O 排放的内 在联系还有待进一步研究。

表 3 地表 UV-B 辐射增强对小麦植株中 TN、TP 影响/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Effects of enhanced UV-B on concentrations of total N and total P in various plant parts of winter wheat/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

植株部位	TN		TP	
	CK	T	CK	T
植株(返青期)	20.5(0.3)	17.7(2.0)	3.47(0.05)	3.44(0.08)
茎(拔节期)	16.6(0.7)	20.3(1.2)	2.86(0.11)	3.61(0.15)*
叶(拔节期)	47.0(0.9)	51.6(0.9)*	3.46(0.08)	4.07(0.08)**

2.3 地表 UV-B 辐射增强对土壤微生物作用的影响

(1) 地表 UV-B 辐射增强对土壤硝化反硝化作用的影响 从表 4 中可以看出,返青期,地表 UV-B 辐射增强对土壤硝化反硝化作用底物 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 影响不显著(p 分别为 0.648 1 和 0.238 9);拔节期,与对照相比,地表 UV-B 辐射增强对土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 影响差异显著(p 分别为 0.019 59 和 0.021 71), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 增加了 14.6 倍, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 增加了 36.5%。表 4 还表明,反硝化细菌计数的结果无显著差异。亚硝酸细菌计数因故未测出,但据李元等对 UV-B 处理下的春小麦拔节期根际土壤亚硝酸细菌计数的报道表明,在低强度 UV-B 处理(相当于

20% 以下的 O_3 衰减)下亚硝酸细菌数量是降低的,而在高强度 UV-B 处理(相当于 20% 及其以上的 O_3 衰减)下其数量是增加的^[10]。本实验处理强度属于后者。Panek 等认为土壤充水孔隙度(water-filled pore space, WFPS)为 75% 是硝化和反硝化作用转换的分界点。WFPS 小于 75%,硝化作用是土壤中主要的 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^[22]。本次拔节期土壤样品的 WFPS 为 27.6%,说明土壤含水量偏低, N_2O 的产生主要是硝化作用的结果。结合上述硝化底物和亚硝酸细菌数量增多的情况,说明在本实验 UV-B 强度处理下土壤硝化作用有可能是增强的(因本次实验未测土壤的硝化和反硝化强度,故不能完全肯定其硝化作用是增强的),但因土壤硝化作用产生的 N_2O 量较少,在土壤-小麦整个系统排放的 N_2O 中所占比例较小,小麦植株对系统 N_2O 的排放贡献较大^[23],而 UV-B 增强主要是对小麦植株的生理生化过程产生显著的影响,故整个系统 N_2O 排放 通量依旧表现为减少。

(2) 地表 UV-B 辐射增强对土壤微生物 C、N 的影响 表 4 表明,拔节期,地表 UV-B 辐射增强对土壤微生物 C 的影响差异达极显著($p = 0.000 17$),增加了土壤微生物 C 的含量,增值达 67.0%;对土壤微生物 N 的影响也达显著水平($p = 0.040 16$),使得微生物 N 的含量增加了 22.3%。UV-B 辐射处理导致土壤微生物 C/N 由原来的 5.0 转变成 6.8,说明 UV-B 辐射可能改变了土壤微生物类群组成,因为细菌的 C/N 在 4~ 5: 1,而真菌的 C/N 为 9~ 10: 1^[24],有研究指出 UV-B 处理显著降低春小麦根际土壤细菌总数,而对真菌的影响较小^[10],这或许是土壤微生物 C/N 增加的原因。UV-B 辐射对土壤的穿透能力通常不超过 5mm^[25],所以 UV-B 对土壤中硝化反硝化作用底物 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及微生物 C、N 的影响主要是通过直接影响小麦生长生理代谢过程,导致其根部吸收有效 N 能力降低,根系分泌物发生变化等间接导致根区土壤中有效 N

表 4 UV-B 辐射增强对小麦根区土壤与 N_2O 排放相关指标的影响

Table 4 Effects of enhanced UV-B on items related to N_2O emission of winter wheat rhizosphere in two stages

相关指标	返青期		拔节期	
	CK	T	CK	T
$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	55.6(4.0)	42.3(8.7)	21.9(2.1)	29.9(0.3)*
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.7(10.9)	27.8(14.9)	0.14(0.12)	2.0(0.5)*
微生物碳/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			174.5(3.6)	291.4(2.1)**
微生物氮/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			35.2(2.5)	43.0(0.8)*
反硝化细菌/ $10^4/\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$			7.2(1.5)	9.5(7.8)

的积累,微生物 C/N 比发生改变. Johnson 等的报道是 UV-B 处理降低了亚北极区石南树丛的土壤微生物的 C/N^[12],本结果与之存有不一致性,或许就是不同植物对 UV-B 的响应不同所导致的结果.

如何区分 UV-B 辐射对土壤-冬小麦系统中土壤和作物各分量 N₂O 排放的影响,将上述相关指标与 N₂O 的排放紧密联系起来,仍需进一步的研究.

3 结论

(1) UV-B 辐射增强 20% 在小麦返青期对土壤-小麦系统 N₂O 的排放无显著影响,但在拔节期显著降低了该系统 N₂O 的排放,减少了该系统的呼吸速率.

(2) UV-B 辐射增强对 N₂O 的影响机理主要表现在对小麦植株生理代谢过程的影响,尤其是 N 代谢过程的影响,如地上部分生物量的显著减少,叶片中可溶性蛋白质、TN、TP 的量显著增加. UV-B 辐射增强对小麦根区土壤微生物作用的影响可能是间接的,具体表现为增加了土壤中有效 N、土壤微生物碳氮的量,改变了土壤微生物的 C/N.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001. (<http://www.ipcc.ch/>). 2001.
- [2] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(5): 1105~ 1111.
- [3] UNEP/WMO. Executive Summary, Scientific Assessment of Ozone Depletion: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47[R]. UNEP/WMO, 2002.
- [4] McKenzie R L, Bjorn L O, Bais A, et al. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface[J]. Photochem. Photobiol. Sci., 2003, 2(1): 5~ 15.
- [5] 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.
- [6] Sullivan J H. Effects of increasing UV-B radiation and atmospheric CO₂ on photosynthesis and growth: implications for terrestrial ecosystem[J]. Plant Ecology, 1997, 128: 195~ 206.
- [7] Nogues S, Allen D J, Morison J I L, et al. Characterization of stomatal closure caused by ultraviolet-B radiation[J]. Plant Physiology, 1999, 121: 489 ~ 496.
- [8] Dai Q, Peng S, Chavez A Q, et al. Intraspecific response of 188 rice cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation[J]. Environmental and Experimental Botany, 1994, 34(4): 433~ 442.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ghisi R, Trentin A R, Masi A, et al. Carbon and nitrogen metabolism in barley plants exposed to UV-B radiation[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116: 200~ 205.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Smart D R, Bloom A J. Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation[J]. PNAS, 2001, 98(14): 7875~ 7878.
- [18] Huang Y, Jiao Y, Zong L G, et al. Nitrous oxide emissions from wheat-growing season in eighteen Chinese paddy soils: an outdoor pot experiment[J]. Biol. Fertil. Soils, 2002, 36: 411 ~ 417.
- [19] 库姆斯 J, 霍尔 D O, 朗 S P, 等. 生物生产力和光合作用测定技术[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 234~ 235.
- [20] 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.
- [21] 李莹, 陈冠雄, 徐慧, 等. 苗期玉米、大豆在土壤-植物系统 N₂O 排放中的贡献[J]. 环境科学, 2003, 24(6): 38 ~ 42.
- [22] Panek J A, Matson P A, Ortyz-Monasterio I, et al. Distinguishing nitrification and denitrification sources of N₂O in a Mexican wheat system using ¹⁵N[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 506~ 514.
- [23] Zou J W, Huang Y, Sun W J, et al. Contribution of plants to N₂O emissions in soil-winter wheat ecosystem: pot and field experiments[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1/2): 205~ 211.
- [24] 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.
- [25] 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]. Biol. Fertil. Soils, 1994, 18: 19 ~ 26.