

徐 鹏, 王秋敏, 蒋梦蝶, 等. UV-B 辐射促进红壤水稻土中碳氮转化[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 793–798.

XU Peng, WANG Qiu-min, JIANG Meng-die, et al. UV-B radiation facilitates the transformation of carbon and nitrogen in red paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 793–798.

UV-B 辐射促进红壤水稻土中碳氮转化

徐 鹏¹, 王秋敏^{1,2}, 蒋梦蝶¹, 林 杉¹, 邬 磊¹, 赵劲松¹, 胡荣桂^{1,3*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖北省襄阳市环境保护监测站, 湖北 襄阳 441000; 3. 华中农业大学环境生态中心, 武汉 430070)

摘 要:以母质相同而有机质含量不同的两种水稻土(高有机质土, HO; 低有机质土, LO)为对象, 研究了三种强度的紫外(UV-B)辐射对两种土壤碳、氮转化的影响。结果表明:随着 UV-B 辐射强度的增加, 土壤有机碳(TOC)含量降低, 而可溶性有机碳(DOC)含量增加; UV-B 辐射促进了土壤有机碳的降解和硝态氮的增加。在高强度的 UV-B ($2.83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 辐射处理 96 h 后, LO 和 HO 土壤的 TOC 含量分别减少了 9.89% 和 10.16%, 而 DOC 含量分别提高了 39.24% 和 50.50%; 同样辐射条件下, LO 和 HO 土壤 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量分别比接受辐射前增加了 74.48% 和 81.87%。因此, 在农业生产中为了保护土壤碳库, 减少氮素损失, 应尽量避免地表裸露以降低 UV-B 辐射对土壤碳、氮转化的影响。

关键词:UV-B 辐射; 稻田土; 碳、氮转化; 总有机碳(TOC); 可溶性有机碳(DOC)

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)04-0793-06 doi:10.11654/jaes.2016-1403

UV-B radiation facilitates the transformation of carbon and nitrogen in red paddy soils

XU Peng¹, WANG Qiu-min^{1,2}, JIANG Meng-die¹, LIN Shan¹, WU Lei¹, ZHAO Jin-song¹, HU Rong-gui^{1,3*}

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Xiangyang Environmental Monitoring Station, Hubei, Xiangyang 441000, China; 3. Ecological Environment Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Two red paddy soils developed out of the same parental material with contrasting content of soil organic matter were selected to study the effects of UV-B radiation on soil carbon and nitrogen transformation. Results showed that soil total organic carbon (TOC) content decreased while dissolved organic carbon (DOC) content increased with increasing UV-B radiation level. UV-B radiation facilitated soil organic carbon decomposition and increased soil nitrate. Exposed to the strongest UV-B radiation ($2.83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) for 96 h caused that TOC decreased by 9.89% and 10.16%, DOC increased by 39.24% and 50.50%, and $\text{NO}_3^- \text{--N}$ increased by 74.48% and 81.87% in soils with low and high content of organic matter, respectively. Therefore, in order to protect the carbon pool and reduce nitrogen lose in the agricultural practice, the soil surface should avoid exposing to UV-B radiation as much as possible.

Keywords: UV-B radiation; paddy soils; carbon/nitrogen transformation; total organic carbon (TOC); dissolved organic carbon (DOC)

气候变暖和臭氧层破坏是当前全球面临的重大环境问题之一^[1]。工业革命以来排放到大气中的氯氟烃和氮氧化物的急剧增加, 导致了臭氧层变薄及臭氧空洞的出现, 进而使到达地面的太阳紫外辐射增强^[2]。研究表明, 大气平流层臭氧每减少 1%, 到达地面的太阳紫外辐射增加 2%^[3]。不同强度的紫外辐射

中, 对地球生物造成直接影响的紫外辐射主要是 UV-B 波段的辐射^[4]。该辐射的增强不仅降低作物光合与蒸腾速率^[5], 影响作物生理生化过程^[6], 减少作物产量^[7], 同时也改变土壤微生物的组成与活性^[8-9], 进而影响土壤呼吸^[10]。

作为陆地碳、氮库的土壤是陆地生态系统最重要

收稿日期: 2016-11-03

作者简介: 徐 鹏(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业温室气体减排方面的研究。E-mail: xupengstu192@163.com

* 通信作者: 胡荣桂 E-mail: rghu@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2662016PY098)

Project supported: The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2662016PY098)

的组成部分,且含有大量碳和氮,而土壤生态系统的碳氮循环转化和稳定性直接关系到陆地生态系统的物质循环和能量流动,并在全球变暖等重要环境问题中起着关键作用。UV-B 辐射增强可直接或间接地影响土壤系统中碳、氮的输入和输出,最终影响整个陆地生态系统碳、氮循环过程^[11]。Austin 等^[12]研究发现,在一些干旱地带,UV-B 辐射可使碳的输出加剧,而水分条件充足的湿热生态系统对 UV-B 辐射增强的响应不明显^[13]。姜运生等^[14]研究发现,UV-B 辐射可增加大麦根区土壤有效氮含量和微生物碳、氮量。Skjemstad 等^[15]则指出 UV-B 辐射可打破土壤有机质和矿物之间的连接,消除矿物对有机质的保护作用。目前 UV-B 辐射增强对作物地上部影响方面(如生长发育、生理生化等)的研究较多,但 UV-B 辐射增强对地下部土壤生态过程和物质转化的影响方面研究相对较少。不过,李亚玉^[16]的研究表明 UV-B 辐射增强促进了土壤有机质的降解,胡正华等^[17]的研究表明 UV-B 辐射增强抑制了土壤-作物系统的呼吸作用。那么 UV-B 辐射增强对土壤的碳、氮转化有何影响呢?鉴于此,本文在室内条件下模拟紫外辐射研究 UV-B 辐射增强对土壤碳、氮转化的影响,以期为进一步完善 UV-B 辐射增强对陆地生态系统碳、氮循环影响方面的理论提供支撑。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

供试土壤为第四纪红土母质发育的红壤,采自湖北省黄石市阳新县白沙镇土库村试验区(115°04'E, 29°56'N,海拔 232 m),该试验区年均气温 16.8℃,年均降雨量 1 389.6 mm。按 S 形路线随机选取 8 个采样点进行取样,取表层土(0~15 cm),将采集的两种鲜土样(低有机质水稻土和高有机质水稻土)分别混合均匀,一部分摊放室内通风处,自然风干后过 100 目筛,用于测定土壤全碳和全氮,余下的部分分别用自封袋收集,置于 4℃冰箱冷藏,用于 UV-B 辐射实验。土壤理化性质见表 1。

1.2 试验设计

以低有机质土和高有机质土为研究对象,分别称取 15.00 g 鲜土于高温灭菌的玻璃培养皿中,按实验

需要,将称取的鲜土置于光化学反应箱内,同时控制箱内温度为 25℃左右,箱的三边和顶部均用加厚铝箔包好,防止环境中其他杂质光线射入箱体。辐射能量用紫外辐射光强计(台湾迅驰光学仪器有限公司)测定,UV-B 辐射强度分别设为 0.44、1.54、2.83 W·m⁻²,其中 0.44 W·m⁻² 为对照组,在三种 UV-B 辐射强度下分别连续照射 96 h,并在照射 0、12、24、36、48、72 h 和 96 h 取样。每个时间点均设有 3 个平行组。分别测定样品的总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、硝态氮(NO₃-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)含量。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤 TOC 的测定

在压好模型的铝箔中称取 10 mg 左右过 100 目筛的水稻风干土,压成片状后,将其放入 VarioTOC 总有机碳分析仪加热样品室中进行测定^[18]。

1.3.2 土壤 DOC 的测定

取待测土样,放入 50 mL 离心管中,按土水比(质量体积比)1:5 的比例加入对应量的超纯水。加塞在 300 r·min⁻¹ 摇床中振荡 60 min,然后在 5000 r·min⁻¹ 离心机离心 10 min,最后用 0.45 μm 的微孔滤膜抽滤,滤液用 VarioTOC 总有机碳分析仪进行测定^[18]。

1.3.3 土壤全氮的测定

土壤样品经高锰酸钾和还原铁粉处理后在混合加速剂的参与下,用浓硫酸消煮,之后用超纯水转入开氏反应器中,碱化后蒸馏法分离出的氨再用硼酸吸收,以标准酸溶液滴定,计算土壤全氮含量^[19]。

1.3.4 土壤 NO₃-N、NH₄⁺-N 的测定

取待测土样,以土液比(质量体积比)为 1:5 加入对应量的 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液,加塞振荡 1 h 后,用慢性滤纸过滤,取上清液测样,上流动注射分析仪测定。

1.4 数据处理与分析

用 Excel 2007 软件进行数据整理与绘图,采用 SPSS 17.0 软件进行显著性检测 and 多重比较(LSD 检验)。

2 结果与分析

2.1 不同 UV-B 辐射强度对土壤 TOC 的影响

不同辐射强度下低有机质、高有机质两土中 TOC

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the experimental soils

土壤	TC/g·kg ⁻¹	DOC/mg·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	pH	容重/g·cm ⁻³
低有机质土	22.20±0.12	10.06±0.09	1.44±0.01	5.63±0.07	1.66±0.01
高有机质土	33.80±0.15	16.35±0.10	1.97±0.03	6.46±0.09	1.51±0.02

含量逐渐降低,在实验初期下降迅速(图 1)。UV-B 辐射强度对低有机质土中 TOC 分解无显著影响,不同辐射强度间土壤总有机碳含量差异不显著。而 UV-B 辐射强度对高有机质土中 TOC 分解有显著影响,不同辐射强度间 TOC 含量差异显著($P<0.05$),在经过 0.44、1.54、2.83 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 三种辐射强度照射 96 h 后,高有机质土中 TOC 分别达到 29.44、27.87、27.53 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与初始时刻(0 h)相比,分别减少了 3.39%、9.05%、10.16%。UV-B 辐射增强显著提高了高有机质土中 TOC 的分解速率。

2.2 不同 UV-B 辐射强度对土壤 DOC 的影响

不同辐射强度下低有机质、高有机质两土中 DOC 含量逐渐增加,在实验初期增加迅速(图 2)。UV-B 辐射强度对两土中 DOC 含量都有显著影响,UV-B 辐射增强显著促进了土壤中 DOC 的生成。在经过 0.44、1.54、2.83 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 三种辐射强度照射 96 h 后,低有机质土中 DOC 分别达到 10.45、12.10、12.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与初始时刻(0 h)相比,分别增加了 15.28%、33.52%、39.24%;高有机质土中 DOC 分别达到 16.04、

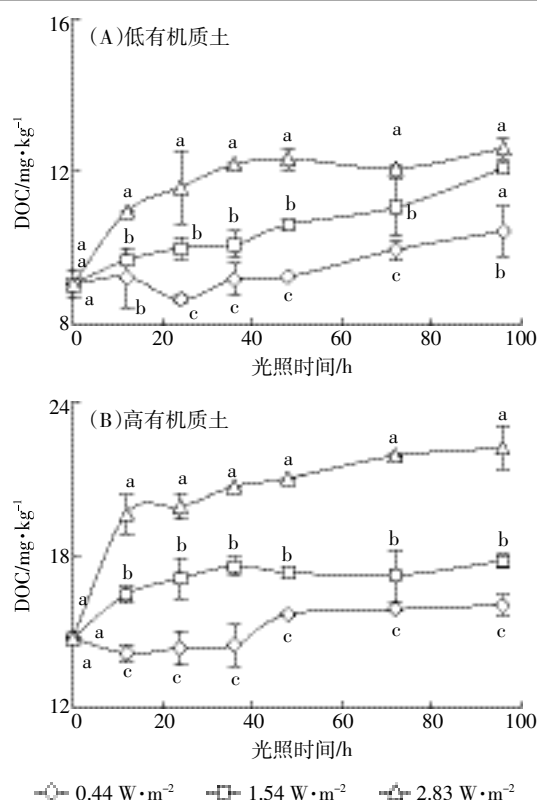


图 2 不同 UV-B 辐射强度下 DOC 含量随时间变化情况

Figure 2 The variations of DOC over time at different radiation dose levels

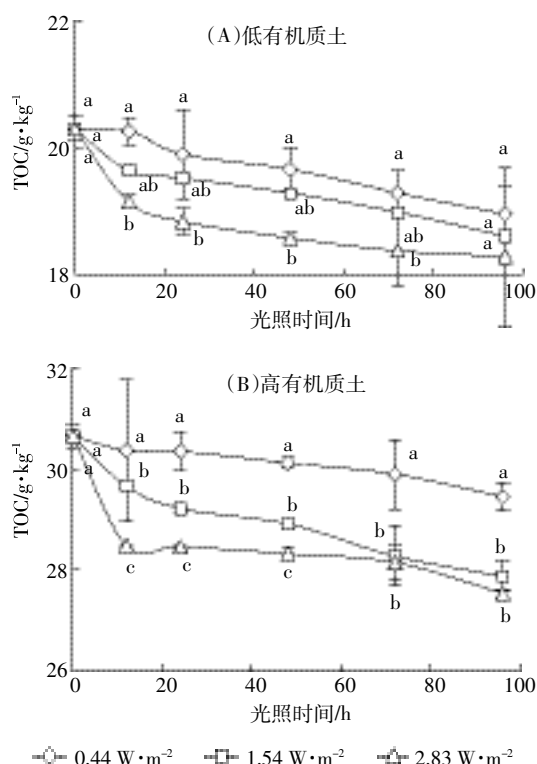
17.77、22.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与初始时刻(0 h)相比,分别增加了 8.76%、20.49%、50.50%。

2.3 不同 UV-B 辐射强度对土壤 NO_3^- -N 的影响

不同 UV-B 辐射强度下低有机质、高有机质两土中 NO_3^- -N 含量逐渐增加(图 3)。UV-B 辐射强度对两土中 NO_3^- -N 的含量有显著影响,且在高有机质土中不同辐射强度间 NO_3^- -N 含量差异显著($P<0.05$)。经过 0.44、1.54、2.83 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 三种辐射强度照射 96 h 后,低有机质土中 NO_3^- -N 分别达到 14.61、14.82、18.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与初始时刻(0 h)相比,分别增加了 40.77%、42.80%、74.48%;高有机质土中 NO_3^- -N 分别达到 25.25、28.42、30.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与初始时刻(0 h)相比,分别增加了 52.31%、71.45%、81.87%。

2.4 不同 UV-B 辐射强度对土壤 NH_4^+ -N 的影响

不同 UV-B 辐射强度下低有机质土和高有机质土中 NH_4^+ -N 含量变化不一致(图 4)。UV-B 辐射强度对两土中 NH_4^+ -N 含量有显著影响,且低有机质、高有机质两土 NH_4^+ -N 含量分别在不同辐射强度间差异显著($P<0.05$)。经过 0.44 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 2.83 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 辐射强度照射 96 h 后,与初始时刻(0 h)相比,低有机质土壤中



不同字母表示不同辐射强度下差异显著。下同
Different letters indicate significant differences between radiation dose levels. The same below

图 1 不同 UV-B 辐射强度下 TOC 含量随时间变化情况

Figure 1 The variations of TOC over time at different radiation dose levels

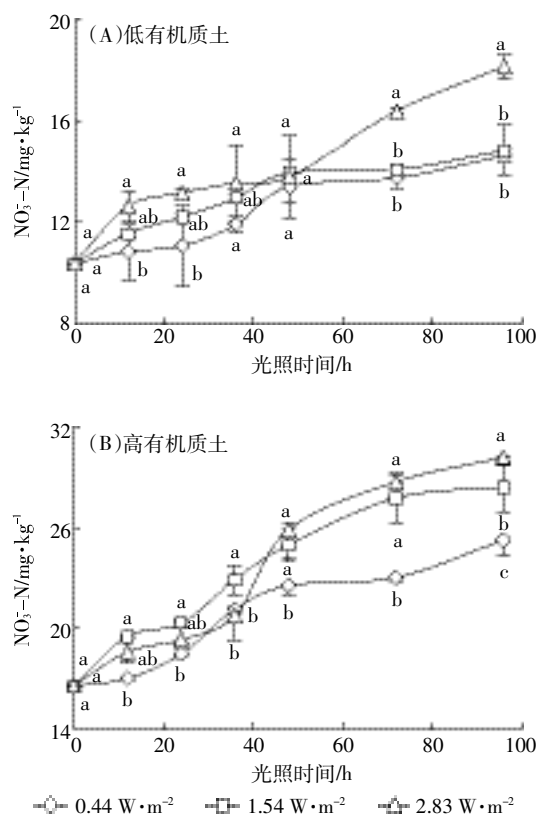


图 3 不同 UV-B 辐射强度下 NO₃-N 含量随时间变化情况
Figure 3 The variations of NO₃-N over time at different radiation dose levels

NH₄⁺-N 分别增加 34.69%、38.31%，而经过 1.54 W·m⁻² 辐射强度照射 96 h 后，则减少 6.80%；高有机质土中 NH₄⁺-N 含量均随时间增加而不断减少，在经过 0.44、1.54、2.83 W·m⁻² 三种辐射强度照射 96 h 后，高有机质土中 NH₄⁺-N 分别达到 5.90、3.66、2.86 mg·kg⁻¹，与初始时刻(0 h)相比，分别减少了 27.54%、54.99%、64.86%。

2.5 各指标间相关性分析

将两种土壤不同辐射强度下的土壤指标进行相关性分析，结果如表 2 所示。低有机质土中 TOC 与 DOC、NO₃-N 呈极显著负相关关系，而 DOC 与 NO₃-N 呈极显著正相关关系。高有机质土中 TOC 与 DOC、NO₃-N 呈极显著负相关关系，与 NH₄⁺-N 呈极显著正相关关系；而 DOC 与 NO₃-N 呈极显著正相关关系，与 NH₄⁺-N 呈极显著负相关关系；NO₃-N 与 NH₄⁺-N 呈极显著负相关关系。

3 讨论

3.1 UV-B 辐射对土壤有机碳降解的影响

不同 UV-B 辐射强度下，低有机质土和高有机质土中 TOC 随时间的变化情况，说明 UV-B 辐射是影

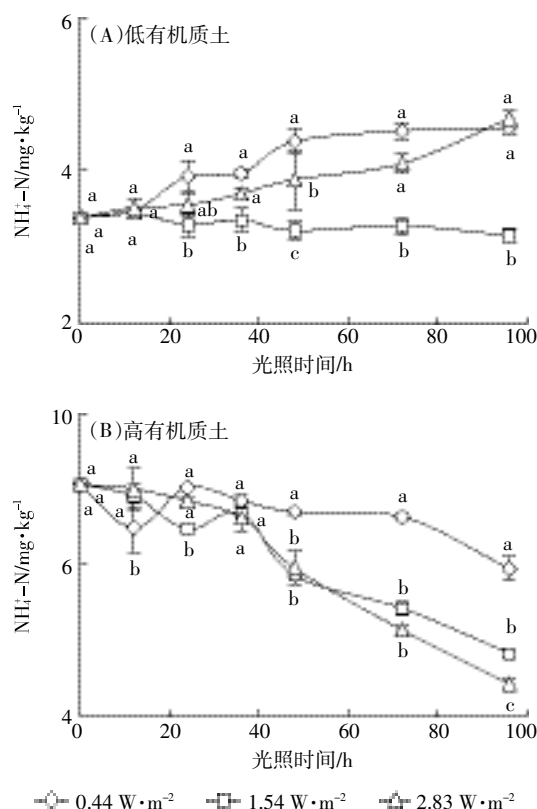


图 4 不同 UV-B 辐射强度下土中 NH₄⁺-N 含量随时间变化情况
Figure 4 The variations of NH₄⁺-N over time at different radiation dose levels

响土壤 TOC 变化的一个重要因素。因为 UV-B 辐射可破坏土壤有机质与矿物之间的连接(矿物通过它们巨大的表面积和拥有的多种活性位点与有机化合物结合)，进而消除土壤矿物对有机质的保护作用^[15]。此外，UV-B 辐射不但能够影响土壤团聚体中有机质的变化，促进有机质光化学氧化，还能促使大分子有机

表 2 不同 UV-B 辐射强度下各指标相关性分析结果
Table 2 Correlation analysis of different index at different radiation dose levels

土壤	R	TOC	DOC	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N
低有机质土	TOC	1			
	DOC	-0.947**	1		
	NO ₃ -N	-0.915**	0.836**	1	
	NH ₄ ⁺ -N	-0.367	0.176	0.542*	1
高有机质土	TOC	1			
	DOC	-0.888**	1		
	NO ₃ -N	-0.790**	0.654**	1	
	NH ₄ ⁺ -N	0.786**	-0.621**	-0.931**	1

注：* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。
Note：*indicates significant correlation at 0.05 level(double sides)，**indicates significant correlation at 0.01 level(double sides)。

物转化成易溶于水、能被微生物迅速利用的小分子有机物^[20-21]。不同辐射强度下两土壤中 TOC 含量差异显著性的不同可能与土壤性质有关,因为在有机质含量高的土壤中, NO_3^- -N 含量较高,在 UV-B 辐射下, NO_3^- -N 发挥光敏剂的作用,促进了土壤碳的溶解^[16];且有机质含量高的土壤中腐植酸含量也高,腐植酸可将吸收的紫外光能量传递给氧分子而形成氧基和羟基自由基,从而引发土壤中化学物质的光降解^[22]。两种土壤中,DOC 含量随 UV-B 辐射时间的增加而增加,且辐射越强,DOC 含量越高,因为土壤中 TOC 在辐射后转化为其他形式碳化合物过程中会产生大量 DOC^[23]。另一方面, NO_3^- -N 在发挥光敏剂的作用过程中促进了大分子有机物的矿化产生 DOC^[16]。此外,UV-B 辐射可改变有机体的生物可利用性^[24],使得微生物更容易将有机质分解成小分子释放到土壤中^[25]。

3.2 UV-B 辐射对土壤氮的影响

不同 UV-B 辐射强度下,低有机质土和高有机质土中无机氮随时间的变化情况,说明 UV-B 辐射是影响土壤无机氮变化的一个重要因素,UV-B 辐射强度越强,无机氮含量变化越剧烈。因为土壤有机质在矿化过程中产生无机氮,并主要以氧化态的 NO_3^- -N 存在^[26]。此外,UV-B 辐射可通过影响土壤的化学组成来改变土壤生态系统中微生物数量^[27],李元等^[8]发现高强度 UV-B 辐射能增加根际土壤亚硝酸细菌和硝化细菌数量,本试验中 UV-B 辐射强度逐渐增强,可能随着辐射强度的增加参与硝化作用的细菌数量增加,从而促进土壤硝化作用^[28],导致 NO_3^- -N 含量的增加。在 UV-B 辐射下,有机质矿化同时也会生成 NH_4^+ -N,但 UV-B 辐射同时也促进 NH_4^+ -N 的继续氧化,所以在整个辐射过程中, NH_4^+ -N 总体上是减少的。虽然 UV-B 辐射能够促进土壤硝化作用,但在低有机质土中,由于初始 NH_4^+ -N 含量低,并且土壤 pH(5.63)也较低,硝化作用在一定程度上受到抑制^[29],虽接收同样强度的 UV-B 辐射,但硝化作用不强烈^[28], NH_4^+ -N 生成速率大于消耗速率,故 NH_4^+ -N 表现增加趋势。而高有机质土中,由于初始 NH_4^+ -N 含量较高,且土壤 pH(6.46)更适合硝化作用的进行^[29],经 UV-B 辐射后,土壤硝化作用强烈^[28], NH_4^+ -N 消耗速率大于生成速率,导致高有机质土中 NH_4^+ -N 最终减少。

3.3 UV-B 辐射对土壤碳、氮耦合的影响

土壤中碳、氮代谢关系密切,两者相互制约。在 UV-B 辐射对土壤碳的影响中,UV-B 辐射强度越强,TOC 降幅越大,说明土壤有机质矿化越剧烈。已

有文献报道土壤有机碳的矿化伴随着土壤有机氮的矿化^[30]。本实验观测到,UV-B 辐射强度越强,无机氮含量变化越剧烈,证实有机质确实发生了矿化,有机质矿化过程中大量有机氮转化为无机氮。对两土壤碳、氮指标相关性分析(表 2)可知,两土壤中 TOC 与 NO_3^- -N 都呈极显著正相关关系,且高有机质土中 TOC 与 NH_4^+ -N 呈极显著负相关关系。这进一步说明了碳、氮的耦合关系。

4 结论

(1)UV-B 辐射增强促进了土壤有机质的矿化,且辐射强度越强,有机质矿化越剧烈,即土壤 TOC 减少得越快。

(2)UV-B 辐射强度促进了无机态氮的转化,特别是促进了 NO_3^- -N 的生成,且辐射强度越强,生成 NO_3^- -N 的含量越高;但对于 NH_4^+ -N,辐射越强,低有机质土中 NH_4^+ -N 含量有增加趋势,高有机质土中 NH_4^+ -N 含量降幅越大。

因此,在农业生产中应尽量避免地表裸露,以降低 UV-B 辐射对土壤碳、氮转化的影响,进而保护土壤碳库。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment. Report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 胡正华,凌慧,陈书涛,等. UV-B 增强对稻田呼吸速率、 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3018-3022.
HU Zheng-hua, LING Hui, CHEN Shu-tao, et al. Impacts of enhanced UV-B radiation on respiration rate, CH_4 and N_2O emission fluxes from rice paddy[J]. *Environment Science*, 2011, 32(10): 3018-3022.
- [3] Kerril B. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion[J]. *Science*, 1994, 262: 1032-1034.
- [4] 王少彬,苏维翰,魏鼎文. 太阳紫外线的生物有效辐射与大气臭氧含量减少的关系[J]. 环境科学学报, 1993, 13(1): 114-119.
WANG Shao-bin, SU Wei-han, WEI Ding-wen. Biologically effective radiation of solar ultraviolet radiation and the depletion of ozone layer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1993, 13(1): 114-119.
- [5] Yang S H, Wang L J, Li S H, 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.
- [6] Pandey J, Kanambari C. Effects of enhanced UV-B radiation on physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Research on Crops*, 2007, 8(2): 401-405.
- [7] Yao Y N, Xuan Z Y, Li Y, 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.
- [8] 李元, 杨济龙, 王勋陵. 紫外辐射增强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. Enhanced ultraviolet radiation impacts on the number of spring wheat rhizosphere microorganisms[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(2):157–160.
- [9] 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(6936):137–138.
- [10] 陈书涛, 胡正华, 李涵茂, 等. 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的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(5):1249–1254.
CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, LI Han-mao, et al. Temperature sensitivity of wheat plant respiration and soil respiration influenced by increased UV-B radiation from elongation to flowering periods[J]. *Environment Science*, 2009, 30(5):1249–1254.
- [11] 柳淑蓉, 胡荣桂, 蔡高潮. UV-B 辐射增强对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7):1992–1998.
LIU Shu-rong, HU Rong-gui, CAI Gao-chao. Effects of enhanced UV-B radiation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A review[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2012, 23(7):1992–1998.
- [12] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation[J]. *Nature*, 2006, 442(7102):555–558.
- [13] Adair E C, Parton W J, Del Grosso S J, et al. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(11):2636–2660.
- [14] 娄运生, 程焕友, 王恩眷, 等. UV-B 辐射增强下施氮对大麦微生物量碳、氮的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13):219–224.
LOU Yun-sheng, CHENG Huan-you, WANG En-juan, et al. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation and nitrogen levels on microbial biomass carbon and nitrogen of barley[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(13):219–224.
- [15] Skjemstad J O, Janik L J, Head M J, et al. High energy ultraviolet photo-oxidation: A novel technique for studying physically protected organic matter in clay- and silt-sized aggregates[J]. *J Soil Sci*, 1993, 44(3):485–499.
- [16] 李亚玉. 光照对土壤有机质稳定性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015:20–25.
LI Ya-yu. Effect of light on the stability of soil organic matter[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2015:20–25.
- [17] 胡正华, 杨燕萍, 陈书涛, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8):1130–1134.
HU Zheng-hua, YANG Yan-ping, CHEN Shu-tao, et al. Combined effect of enhanced UV-B radiation and straw addition on CO₂ emission from soil-winter wheat system[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(8):1130–1134.
- [18] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4):544–551.
LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):544–551.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000:42–48.
- BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:42–48.
- [20] Feng X, Hills K M, Simpson A J, et al. The role of biodegradation and photo-oxidation in the transformation of terrigenous organic matter[J]. *Org Geochem*, 2011, 42(3):262–274.
- [21] Skjemstad J O, Krull E, Swift R, et al. Mechanisms of protection of soil organic matter under pasture following clearing of rainforest on an Oxisol[J]. *Geoderma*, 2008, 143(3/4):231–242.
- [22] 黄耀, 刘世梁. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):709–714.
HUANG Yao, LIU Shi-liang. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):709–714.
- [23] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源碳输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3525–3530.
LIU De-yan, SONG Chang-chun, WANG Li, et al. Exogenous nitrogen enrichment impact on the carbon mineralization and DOC of the freshwater marsh soil[J]. *Environment Science*, 2008, 29(12):3525–3530.
- [24] Zepp R G, Erickson III D J, Paul N D, et al. Interactive effects of solar UV radiation and climate change on biogeochemical cycling[J]. *Photochem Photobiol Sci*, 2007, 6:286–300.
- [25] Konstantinou I K, Zarkadis A K, Albanis T A. Photodegradation of selected herbicides in various natural waters and soils under environmental conditions[J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(1):121–130.
- [26] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):898–905.
MA Li, YANG Lin-zhang, XIAO He-ai, et al. Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soil in subtropical China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):898–905.
- [27] 祖艳群, 魏兰芳, 杨济龙, 等. 紫外辐射增加对 40 个割手密无性系土壤微生物种群数量动态和多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1):6–11.
ZU Yan-qun, WEI Lan-fang, YANG Ji-long, et al. Effects of UV-B radiation on population dynamic and diversity of 40 wild sugarcane (*Saccharum spontaneum* L.) clones rhizosphere microorganisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):6–11.
- [28] 胡正华, 杨燕萍, 李涵茂, 等. UV-B 辐射增强与秸秆施用对土壤-大豆系统呼吸速率和 N₂O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4):539–543.
HU Zheng-hua, YANG Yan-ping, LI Han-mao, et al. Combined effect of enhanced UV-B radiation and straw addition on respiration rate and N₂O emission from soil-soybean system[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(4):539–543.
- [29] 封克, 王子波, 王小治, 等. 土壤 pH 变化对硝酸根还原过程 N₂O 产生的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(1):81–86.
FENG Ke, WANG Zi-bo, WANG Xiao-zhi, et al. Effect of soil pH on N₂O production in nitrate reduction[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):81–86.
- [30] Khalil M I, Hossain M B, Schmidhalter U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(8):1507–1518.