

# UV-B 辐射对杉木凋落叶分解的影响\*

张慧玲<sup>1</sup> 宋新章<sup>1\*\*</sup> 张智婷<sup>2</sup> 江洪<sup>1</sup> 王懿祥<sup>1</sup> 白尚斌<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300; <sup>2</sup> 河北北方学院, 河北张家口 075000)

**摘要** 采用分解袋法对自然和 UV-B 辐射滤减环境下的杉木凋落叶进行分解试验. 结果表明: 与对照相比, UV-B 辐射滤减处理使杉木凋落叶的分解速率降低了 69.6% ( $P < 0.001$ ), 凋落叶中氮、磷和木质素的相对含量分别增加 150%、83.3% 和 13.8%, 抑制了钾和碳的释放. 木质素光降解在杉木凋落叶分解过程中的作用不明显. UV-B 辐射可以加快杉木凋落叶的分解, 促进氮、磷、钾和碳的释放, 以及杉木林凋落物层的营养周转速度, 增加地表的碳通量, 对杉木林的碳源或碳汇功能具有潜在的影响.

**关键词** 凋落叶分解 UV-B 辐射 营养循环 木质素 杉木

**文章编号** 1001-9332(2011)04-0845-06 **中图分类号** Q948; S718.5 **文献标识码** A

## Effects of UV-B radiation on the decomposition of *Cunninghamia lanceolata* leaf litter.

ZHANG Hui-ling<sup>1</sup>, SONG Xin-zhang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-ting<sup>2</sup>, JIANG Hong<sup>1</sup>, WANG Yi-xiang<sup>1</sup>, BAI Shang-bin<sup>1</sup> (<sup>1</sup> Zhejiang Province Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; <sup>2</sup> Hebei North College, Zhangjiakou 075000, Hebei, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(4): 845-850.

**Abstract:** A litterbag experiment was conducted to study the decomposition of *Cunninghamia lanceolata* leaf litter under ambient and reduced UV-B radiation (22.1% below ambient). Comparing with ambient treatment, the reduced treatment decreased the decomposition rate of *C. lanceolata* leaf litter by 69.6% ( $P < 0.001$ ), making the relative contents of nitrogen (N), phosphorus (P), and lignin in the litter increased by 150%, 83.3%, and 13.8%, respectively, and the release of potassium (K) and carbon (C) slowed down. In the process of litter decomposition, photo-degradation of lignin didn't play crucial role. The results suggested that UV-B radiation could accelerate the decomposition rate of *C. lanceolata* leaf litter, promote the release of N, P, K, and C from it, and increase the nutrients turnover rate in litter layer as well as the carbon flux on the ground, giving potential effects on the function of *C. lanceolata* forest as a carbon source or sink in humid subtropical China.

**Key words:** leaf litter decomposition; UV-B radiation; nutrient cycling; lignin; *Cunninghamia lanceolata*.

过去的 30 年中, 人类活动排放的大量氟氯烷烃 (CFCs) 导致大气臭氧层变薄, 已造成北半球中纬度地区紫外线-B (UV-B) 辐射增加了 5%<sup>[1]</sup>. 目前人类已通过各种措施减少氟氯烷烃的排放, 但由于其半衰期长达 50 ~ 150 a, 先前排放的氟氯烷烃仍将长期

残留在大气中, 臭氧层变薄的趋势在短期内难以逆转, 导致今后较长一段时间内陆地表面的 UV-B 辐射强度仍将维持在较高水平<sup>[1-2]</sup>. 目前 UV-B 辐射变化对陆地生态系统的影响已成为全球环境变化研究中的前沿和热点问题之一<sup>[3]</sup>. 作为陆地生态系统物质循环和能量转换的主要途径, 森林凋落物的分解对森林生态系统生产力和碳估算有着重要的科学意义<sup>[4-6]</sup>. UV-B 辐射变化将不可避免地影响到森林凋落物的分解过程和营养元素释放, 因此, 研究 UV-B 辐射变化对凋落物分解的影响, 对于阐述生态系统中凋落物的周转、生物地球化学循环和土壤营养动

\* 国家自然科学基金项目(30800152, 31070440)、浙江省自然科学基金项目(Y5090007)、国家基础研究发展规划重点项目(2010CB950702, 2010CB428503)、国家高新技术研究发展计划项目(2009AA122001, 2009AA122005)、科技部重大基础性研究项目(2007FY110300-08)和浙江农林大学科研启动基金项目(2007FR075)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: songxinzhang@gmail.com

2010-11-01 收稿, 2011-01-20 接受.

态极其重要,也是当前生态系统对全球环境变化响应研究中一个重要组成部分<sup>[7-9]</sup>.

UV-B 辐射变化将对凋落物的分解产生直接和间接的影响.通过对木质素的光降解作用或者改变生物分解者的群落组成、数量和活性直接作用于凋落物的分解过程,通过影响植物生长期间叶片的化学成分及其凋落叶分解时影响分解者的群落组成和活性而最终作用于分解过程<sup>[10]</sup>.目前,国内外学者开展的 UV-B 辐射对植物凋落物分解的影响试验,大多集中于对草本植物的研究<sup>[11-13]</sup>,对木本植物凋落物分解的直接影响研究还很少<sup>[14-15]</sup>.而且研究地点大多位于干旱半干旱的温带地区,对湿润亚热带地区木本植物凋落物分解的研究尚未见报道<sup>[13,16]</sup>.UV-B 辐射对凋落物分解过程的作用受到降水等环境因子的调节.干旱条件下,UV-B 辐射对凋落物的光降解作用占主导地位;而在湿润条件下,其抑制作用占优势<sup>[15]</sup>,因此,研究 UV-B 辐射对我国亚热带地区凋落物分解的影响具有重要意义.

目前国内外有关 UV-B 辐射影响凋落物分解的研究主要采取模拟 UV-B 辐射增加或滤减 2 种方法.模拟 UV-B 辐射增加主要通过紫外灯管来增加 UV-B 辐射,但不能准确模拟自然日光中 UV-B 辐射强度的变化,且易受天气状况的影响,其结果往往夸大了 UV-B 的实际影响<sup>[3,15]</sup>;模拟 UV-B 辐射滤减方法是采用聚酯薄膜滤掉部分 UV-B,造成低于周围 UV-B 辐射的环境,研究凋落物的分解动态.该方法默认 UV-B 辐射的生物效应随辐射强度线性增加,其结果用来说明未来 UV-B 辐射增强对凋落物分解造成的可能影响<sup>[3]</sup>.该方法的优点是各处理间的 UV-B 辐射较均匀,随日光的日变化和季节变化而变化,避免了 UV-B 增强处理中灯管的遮阴作用,且操作简便、成本低,因此在相关研究中广泛应用<sup>[4,7,9-10,17-18]</sup>.本文采用 UV-B 辐射滤减方法,研究了 UV-B 辐射对我国亚热带地区广泛分布的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 凋落叶分解及养分释放的影响,以期为深入理解 UV-B 辐射变化对我国亚热带陆地生态系统的影响提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究地点位于浙江省临安市平山村浙江农林大学野外科研试验基地内,地理坐标为 119°42' E, 30°14' N.该区地处中亚热带季风气候区的北缘,四季分明,雨量充沛,年均气温 15.6 °C,有效积温为

2696.2 °C,年均降水量 1420 mm,无霜期 230 d 左右.土壤为黄红壤.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 UV-B 辐射环境模拟试验** 设置 UV-B 辐射滤减处理和自然光照(对照)两个梯度环境.UV-B 辐射滤减环境模拟采用聚酯薄膜法<sup>[4,7,19-20]</sup>.在 UV-B 滤减处理样地正上方铺设 125 μm 厚的聚酯薄膜,样地四周保持通透,以滤除 UV-C 和部分 UV-B,同时与对照样地的环境因子保持一致.2 个月更换一次薄膜.用双通道 UV-B 辐照计(北京师范大学光电仪器厂)测定聚酯薄膜下的 UV-B 辐射强度,经 Caldwell<sup>[21]</sup>公式转换为生物有效辐射.经测定,UV-B 辐射滤减环境下的强度比自然环境减弱了 22.1%.同时,根据每次降雨的雨量,向 UV-B 滤减处理样地内喷施等量的水.两个月测定一次各样地 0~15 cm 处的土壤含水率.

**1.2.2 凋落叶收集与分解试验** 2008 年 10 月,在天目山国家级自然保护区杉木林内收集地面新近凋落的鲜叶,带回实验室自然风干.凋落叶分解试验采用分解袋法.将风干后的凋落叶装入孔径为 1.0 mm×1.5 mm,大小为 15 cm×15 cm 的分解袋中,每袋约 10 g,标记.测定凋落叶的含水率和初始 C、N、P、K 和木质素含量.于 12 月将凋落叶分解袋分别放入 2 个辐射模拟的样地内,放置时贴近地表模拟凋落物分解的自然状况.在放置分解袋前先对分解样地进行整地,以保证样地土壤基质的一致.从 2009 年 2 月起,每两个月收回一次分解袋,每次每个处理取回 3 袋(即 3 个重复),带回实验室,清除凋落物表面附着的泥沙和其他杂质,在 80 °C 烘箱中烘干至恒量,测定剩余凋落物的质量,然后粉碎,测定 C、N、P、K 和木质素含量.

**1.2.3 化学元素分析** 木质素含量采用 Van Soest 中性洗涤纤维(NDF)及酸性洗涤纤维(ADF)方法测定;碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热(油浴加热)法测定;氮、磷、钾含量用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后,分别采用半微量凯氏法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定.

### 1.3 数据处理

采用 Olson 指数模型<sup>[22]</sup>计算凋落物分解速率:

$$X_t/X_0 = e^{-kt}$$

式中: $X_t$  为时间  $t$  时(a)的干质量; $X_0$  为凋落物的初始干质量; $k$  为凋落物的年分解速率.

养分元素的释放在元素剩余率( $E$ )表示<sup>[9,18]</sup>,

计算公式为:

$$E = [(M_t \times C_t) / (M_0 \times C_0)] \times 100\%$$

式中:  $M_0$  为放置分解袋时袋内凋落叶样品的干质量(g);  $C_0$  为初始养分含量( $g \cdot kg^{-1}$ );  $M_t$  为  $t$  时刻分解袋内凋落叶的干质量(g);  $C_t$  为  $t$  时刻凋落叶的养分含量( $g \cdot kg^{-1}$ ).  $E < 100\%$  时, 表示元素净释放;  $E > 100\%$  时, 表示元素出现了富集.

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较两种环境下凋落叶分解速率的差异, 统计分析用 SPSS 13.0 软件实现.

## 2 结果与分析

### 2.1 UV-B 辐射滤减条件下杉木凋落叶的分解

由图 1 可见, UV-B 辐射滤减处理样地杉木凋落叶分解过程中的干质量剩余率始终大于对照样地. 除分解第 6 个月时两样地干质量剩余率差异不显著 ( $P > 0.05$ ) 外, 其余分解阶段差异均极显著 ( $P < 0.01$ ). 尤其是分解 6 个月后, 对照样地的凋落叶分解速度明显加快, 与 UV-B 辐射滤减处理环境下的分解速度差距进一步加大. 在分解末期, UV-B 辐射滤减条件下杉木凋落叶的干质量剩余率比对照样地高 18.8%.

由表 1 可以看出, 分解模型的相关系数很高, 说明 Olson 指数衰减模型对分解过程的拟合效果很好. 两种处理的杉木凋落叶年分解速率存在极显著差异 ( $P < 0.001$ ). 其中 UV-B 辐射滤减处理的凋落叶年分解速率比对照减慢了 69.6%, 50% 和 95% 分解所需时间也分别比对照多了 7.42 a 和 32.08 a. 这说明 UV-B 辐射滤减显著降低了杉木凋落叶的分解速率.

表 2 杉木凋落物分解过程中化学成分的变化

Table 2 Change of chemical compositions during leaf litter decomposition of *Cunninghamia lanceolata*

月份 Month	处理 Treatment	N (%)	P (%)	K (%)	C (%)	木质素 Lignin (%)	C/N	木质素/N Lignin/N	C/P
0	UV-B-	0.40	0.06	0.37	49.5	33.2	124.3	83.3	899.1
	CK	0.40	0.06	0.37	49.5	33.2	124.3	83.3	899.1
2	UV-B-	0.34	0.06	0.31	48.1	34.7	142.8	103.2	824.0
	CK	0.36	0.05	0.22	44.4	35.9	122.4	99.0	810.7
4	UV-B-	0.26	0.05	0.37	43.6	34.1	168.2	131.8	811.1
	CK	0.39	0.06	0.05	48.8	36.1	126.5	93.7	814.6
6	UV-B-	0.50	0.05	0.35	42.1	34.6	85.0	69.8	862.1
	CK	0.35	0.06	0.10	37.3	30.3	106.4	86.3	626.5
8	UV-B-	0.26	0.06	0.30	40.5	32.7	157.8	127.3	712.9
	CK	0.38	0.06	0.09	42.3	38.9	111.6	102.6	727.2
10	UV-B-	1.00	0.06	0.27	41.8	37.1	41.6	36.9	730.0
	CK	0.60	0.06	0.04	36.1	42.0	59.7	69.4	599.9
12	UV-B-	1.00	0.11	0.25	40.8	37.7	40.9	37.8	370.9
	CK	0.67	0.08	0.04	40.3	42.8	60.4	64.1	524.1

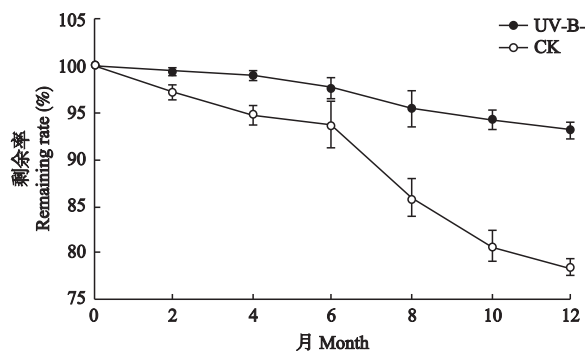


图 1 杉木凋落叶分解过程中干质量剩余率变化

Fig. 1 Percentage of remaining mass to initial mass during litter decomposition of *Cunninghamia lanceolata*.

UV-B-: 滤减 UV-B 辐射 Reduced UV-B radiation; CK: 对照 Ambient UV-B radiation. 下同 The same below.

表 1 UV-B 辐射处理下杉木凋落叶的分解特征

Table 1 Characteristic of litter decomposition of *Cunninghamia lanceolata* under UV-B radiation treatment

处理 Treatment	分解速率 Decomposition rate ( $g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$ )	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )	50% 分解时间 Time of 50% decomposition (a)	95% 分解时间 Time of 95% decomposition (a)
UV-B-	0.07a	0.94	10.45	45.18
CK	0.23b	0.93	3.03	13.1

UV-B-: 滤减 UV-B 辐射 Reduced UV-B radiation; CK: 对照 Ambient UV-B radiation. 下同 The same below. 同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.001$ ) Distinctly lettered values in the same column differed at 0.001 level.

### 2.2 UV-B 辐射处理下杉木凋落叶的化学成分变化

由表 2 可以看出, 在杉木凋落叶分解过程中, 两处理的氮含量呈先降后升的趋势, 且在分解至第 10 个月时开始增加, 至分解末期, UV-B 滤减处理的增幅达 150%, 远高于对照 (67.5%); 磷和木质素含量均呈增加趋势, 其中 UV-B 滤减处理的磷含量的增



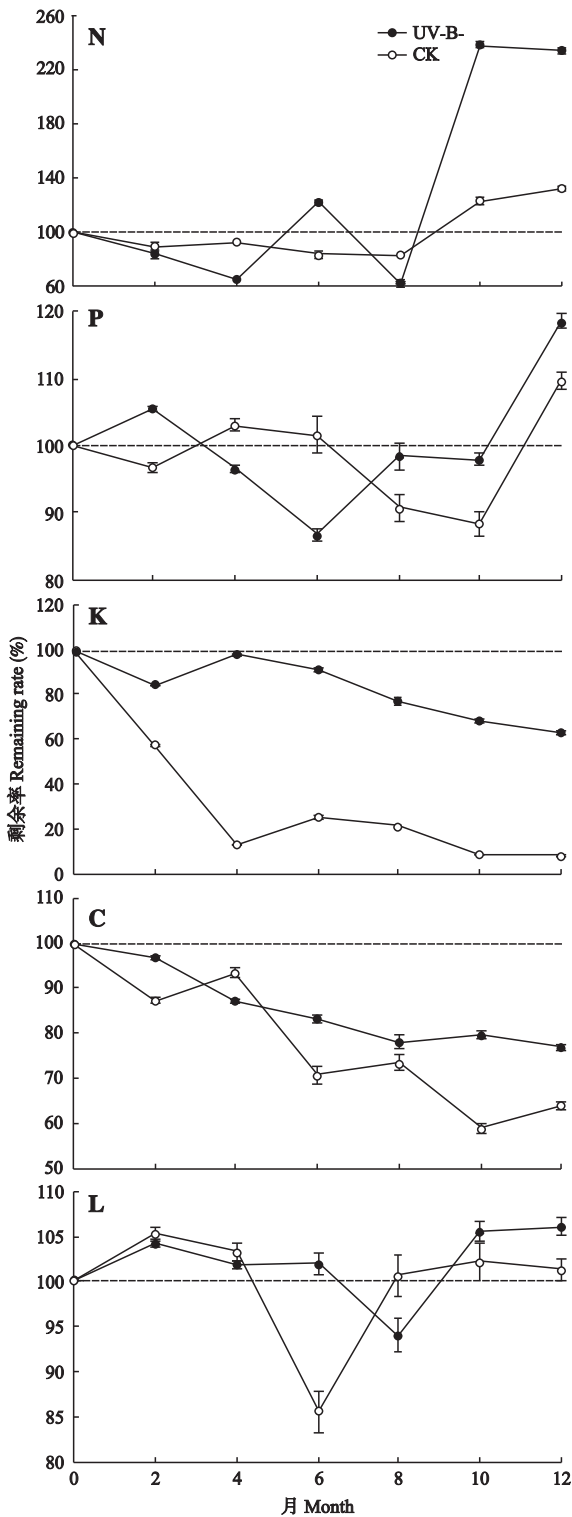


图2 杉木凋落叶分解过程中氮、磷、钾、碳和木质素的释放  
**Fig. 2** Release of N, P, K, C and lignin during leaf litter decomposition of *Cunninghamia lanceolata*.

幅(83.3%)远高于对照(33.3%),而对照处理中木质素增幅(29.1%)则高于UV-B滤减处理(13.8%);钾和碳含量均呈下降趋势,且对照中钾含量的降幅(89.2%)高于UV-B滤减处理

(32.4%);碳含量的下降幅度则较一致.两种环境下的C/N和木质素/N比值均呈下降趋势,且UV-B滤减处理的降幅要大于对照.这可能与UV-B滤减处理的氮含量增幅更大有关.

### 2.3 杉木凋落叶分解过程中化学元素的释放动态

图2为各元素剩余率.在杉木凋落叶分解过程中,两种处理的氮和磷释放均经历了先释放后富集的过程,而且UV-B辐射滤减处理加强了氮和磷的富集作用.钾和碳均表现为净释放,且UV-B辐射滤减处理的释放速度始终低于对照,表明UV-B辐射滤减处理延缓了钾和碳的释放.木质素在两种处理中均表现出富集-降解-富集的特点,但差异不明显.分解过程中木质素含量的增加可能是食碎屑动物优先取食纤维素的结果<sup>[23]</sup>,也可能是微生物副产品的产物<sup>[9]</sup>.

## 3 讨论

### 3.1 UV-B辐射对凋落叶分解的影响

UV-B辐射对凋落物分解过程的直接影响主要有两种机制:通过增加对凋落物木质素的光降解作用来促进分解;通过改变生物分解者的种类、数量和活性来降低凋落物分解速率<sup>[10]</sup>.Austin等<sup>[7]</sup>发现,UV-B辐射滤减导致半干旱草原凋落物分解降低了33%,其中光降解起着主要的控制作用.这与本研究结果一致.但Gallo等<sup>[24]</sup>发现,在6个月的试验中,UV-B辐射对*Pinus edulis*和*Juniperus monosperma*凋落物的分解无明显作用.Verhoef等<sup>[25]</sup>在103d的试验中也发现,紫外辐射没有明显影响草地植物*Calamagrostis epigeios*和*Carex arenaria*混合凋落物的分解.这种差异可能与分解地点的湿度状况、试验所用凋落物类型的化学组成(如氮、碳和木质素含量等)和试验时间长短有关.Smith等<sup>[15]</sup>研究发现,在湿度受限情况下,UV-B辐射可通过光降解作用来加快凋落物的分解;在没有湿度限制的情况下,可通过抑制微生物分解者活性来降低凋落物的分解速率.Brandt等<sup>[17]</sup>对半干旱草地为期3a的田间分解试验结果表明,在干旱状况下,紫外辐射滤减处理减缓了凋落物分解;但在湿润状况下,对其分解的影响不明显.紫外辐射对分解的影响主要是通过光降解引起非生物过程,其在半干旱生态系统凋落物分解过程中的作用大小依赖于干旱程度和凋落物的化学组成.可见,凋落物分解过程是生物因子和非生物因子综合作用的结果,UV-B辐射会加大对凋落物的光降解作用来削弱分解者的生物活性,其作用的

大小将受到自身化学组成和周围环境因子的调节。

植物组织中木质素的含量仅次于纤维素,占每年植物固定碳的近 30%,是典型的抗微生物降解的物质<sup>[23,26]</sup>。在凋落物分解过程中,木质素是阻碍分解酶侵入不稳定碳化合物的结构性物质<sup>[27-28]</sup>。在光降解过程初期,木质素可能是光吸收化合物,纤维素吸收的光能也转移给木质素,引起木质素的光降解<sup>[4]</sup>。光降解会产生不稳定的碳化合物,改变剩余物的化学组成,使细胞壁中原来受木质素保护的化合物发生生物降解的几率大大增加,潜在地改变了分解者的 C/N 临界值<sup>[5]</sup>,增加了凋落物中碳水化合物生物降解的潜力。因此,木质素被看作凋落物中抗分解性最强的物质的决定性因子<sup>[29]</sup>,其光降解是 UV-B 辐射加快分解的主要原因<sup>[19,30]</sup>。本研究中,UV-B 辐射对杉木凋落叶分解过程中木质素的光降解作用不明显,说明 UV-B 辐射加快杉木凋落叶分解可能是其他环境因子(如降水和微生物等)综合作用的结果。其作用机理尚需进一步研究。

### 3.2 UV-B 辐射对凋落叶元素释放的影响

UV-B 辐射对凋落物分解过程影响的生态学意义在于通过影响养分元素和碳释放的进程,影响生态系统的养分循环、初级生产力、碳储量以及土壤与大气间的碳通量<sup>[20,31]</sup>。在凋落物分解过程中,养分的富集与释放主要由凋落物初始组成中碳与养分元素的比值控制。微生物分解者从有机质中吸收碳和养分元素,并同环境交换无机养分,以保持自身的化学计量平衡。在凋落物中碳与养分元素的比值达到分解者的化学计量要求之前,会一直发生元素的富集,之后才会开始释放<sup>[32]</sup>。此外,淋溶等其他物理过程也可以改变凋落物的养分含量。氮和磷是陆地生态系统中植被最重要的两个限制元素<sup>[33]</sup>。一般认为,分解过程中氮和磷的富集和释放是同步变化的,C/N 和 C/P 的阈值范围分别为 5 ~ 15<sup>[5]</sup>和 200 ~ 480<sup>[34-35]</sup>。本研究中,氮和磷经历了类似释放-富集过程(图 2),且在 UV-B 辐射滤减环境下富集作用更强,但并不在上述阈值范围内(表 2)。这或许与 UV-B 辐射改变了分解者的活性及化学计量要求等因素有关。因为分解者能够通过适当降低自身的碳利用率来降低对凋落物碳与养分元素比值的化学计量要求<sup>[5]</sup>。钾是易于淋溶的成分。本研究中,对照样地的钾释放量远远大于 UV-B 辐射滤减环境(图 2),可能与光降解引起的凋落物结构和化学组成的改变有关。这意味着 UV-B 辐射将加快杉木林中氮、磷、钾等营养元素的循环速度,有利于杉木的生长发

育。这与 Austin 等<sup>[7]</sup>和李元等<sup>[36]</sup>的研究相一致。

UV-B 辐射还通过作用于凋落物分解来影响地表凋落物层的碳储量。碳是构成凋落物的主要元素。但在凋落物分解过程中,只有 20% 的碳留存在土壤有机质中<sup>[37]</sup>。据估计,全球每年因凋落物分解(包括枯死根)释放的碳占全球年碳通量的 70%<sup>[38]</sup>。林地凋落物层的碳储量是陆地生态系统碳库的一个重要组成部分,凋落物分解过程中碳的释放速度将影响到生态系统的碳格局和碳平衡。本研究中 UV-B 辐射加快了杉木凋落叶碳的释放(图 2),意味着 UV-B 辐射可能会降低杉木林地地表凋落物层的碳储量,增加杉木林地表的碳通量,进而影响到全球变化背景下杉木林的碳源或碳汇功能。

### 参考文献

- [1] Herman JR. Global increase in UV irradiance during the past 30 years (1979–2008) estimated from satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: D04203, doi: 10.1029/2009JD012219
- [2] Weatherhead EC, Andersen SB. The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature*, 2006, **441**: 39–45
- [3] Flint SD, Ryel RJ, Caldwell MM. Ecosystem UV-B experiments in terrestrial communities: A review of recent findings and methodologies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **120**: 177–189
- [4] Austin AT, Ballaré CL. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**: 4618–4622
- [5] Manzoni S, Jackson RB, Trofymow JA, et al. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 2008, **321**: 684–486
- [6] Parton W, Silver WL, Burke IC, et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, **315**: 361–364
- [7] Austin AT, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, **442**: 555–558
- [8] Song X-Z (宋新章), Jiang H (江洪), Zhang H-L (张慧玲), et al. A review on the effects of global environment change on litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(9): 4414–4423 (in Chinese)
- [9] Brandt LA, King JY, Hobbie SE, et al. The role of photodegradation in surface litter decomposition across a grassland ecosystem precipitation gradient. *Ecosystems*, 2010, **13**: 1–17
- [10] Pancotto VA, Sala OE, Robson TM, et al. Direct and indirect effects of solar ultraviolet-B radiation on long-term decomposition. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1982–1989
- [11] Li Y (李元), Yu M (岳明). *Ultraviolet Radiation Ecology*. Beijing: China Environmental Science Press,

- 2000 (in Chinese)
- [12] Wang H-Y (王海云), Li Y (李元), Zu Y-Q (祖艳群). Effects of UV-B radiation on litter decomposition and mechanism. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2006, **25** (suppl.): 443-446 (in Chinese)
- [13] Zhang H-L (张慧玲), Song X-Z (宋新章), Ai J-G (哀建国), et al. A review of UV-B radiation and its influence on litter decomposition. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2010, **27** (1): 134-142 (in Chinese)
- [14] Newsham KK, McLeod AR, Roberts JR, et al. Direct effects of elevated UV-B radiation on the decomposition of *Quercus robur* leaf litter. *Oikos*, 1997, **79**: 592-602
- [15] Smith WK, GAO W, Steltzer H, et al. Moisture availability influences the effect of ultraviolet-B radiation on leaf litter decomposition. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 484-495
- [16] Liu A-Q (刘爱琴), Ma X-Q (马祥庆). The effect of enhanced ultraviolet-B radiation on xylophyte. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2004, **12**(4): 36-39 (in Chinese)
- [17] Brandt LA, King JY, Milchunas DG. Effects of ultraviolet radiation on litter decomposition depend on precipitation and litter chemistry in a shortgrass steppe ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 2193-2205
- [18] Pancotto VA, Sala OE, Cabello M, et al. Solar UV-B decreases decomposition in herbaceous plant litter in Tierra del Fuego, Argentina; Potential role of an altered decomposer community. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1465-1474
- [19] Day TA, Zhang ET, Ruhland CT. Exposure to solar UV-B radiation accelerates mass and lignin loss of *Larrea tridentata* litter in the Sonoran Desert. *Plant Ecology*, 2007, **193**: 185-194
- [20] Robson TM, Pancotto VA, Scopel AL, et al. Solar UV-B influences microfaunal community composition in a Tierra del Fuego peatland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 2205-2215
- [21] Caldwell MM. Solar ultraviolet radiation and the growth and development of higher plant// Giese AC, ed. *Photophysiol*. New York: Academic Press, 1971
- [22] Olson JS. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological system. *Ecology*, 1963, **44**: 322-331
- [23] Berg B, Johansson M, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests; Substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 1136-1147
- [24] Gallo ME, Sinsabaugh RL, Cabaniss SE. The role of ultraviolet radiation in litter decomposition in arid ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 2006, **34**: 82-91
- [25] Verhoef HA, Verspagen JMH, Zoomer HR. Direct and indirect effects of ultraviolet-B radiation on soil biota, decomposition and nutrient fluxes in dune grassland soil systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **31**: 366-371
- [26] Boerjan W, Ralph J, Baucher M. Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, **54**: 519-546
- [27] Pauly M, Keegstra K. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels. *The Plant Journal*, 2008, **54**: 559-568
- [28] Gressel J. Transgenics are imperative for biofuel crops. *Plant Science*, 2008, **174**: 246-263
- [29] Adair E, Parton W, Del Grosso S, et al. Simple three-pool model accurately describes patterns of long-term litter decomposition in diverse climates. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 2636-2660
- [30] Foereid B, Bellarby J, Meier-Augenstein W, et al. Does light exposure make plant litter more degradable? *Plant and Soil*, 2010, **333**: 275-285
- [31] Niemi R, Martikainen P, Silvola J, et al. Elevated UV-B radiation alters fluxes of methane and carbon dioxide in peatlands microcosms. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 361-371
- [32] Manzoni S, Trofymow JA, Jackson RB, et al. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 2010, **80**: 89-106
- [33] Vitousek P. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 1984, **65**: 285-298
- [34] Gosz J, Likens G, Bormann F. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. *Ecological Monographs*, 1973, **43**: 173-191
- [35] Dziadowiec H. The decomposition of plant litterfall in a oak-linden-hornbeam forest and an oak-pine mixed forest of the Bialoweza National Park. *Acta Societatis Botanico-rum Poloniae*, 1987, **56**: 169-185
- [36] Li Y (李元), Wang X-L (王勋陵), Zu Y-Q (祖艳群). Effect of enhanced UV-B radiation on chemical composition, fungal colonization and decomposition of spring wheat plant. *Chinse Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(2): 223-225 (in Chinese)
- [37] Ngao J, Epron D, Brechet C, et al. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO<sub>2</sub> efflux in a beech forest using <sup>13</sup>C-depleted litter. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1768-1776
- [38] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81-99

作者简介 张慧玲,女,1976年生,硕士.主要从事全球变化和森林土壤相关研究,发表论文6篇. E-mail: zhlzhling@126.com

责任编辑 李凤琴