

网袋埋藏和自然环境下测定森林凋落物早期分解过程的比较

谷永建^{1,2,3}, 李玉梅^{1,2,3}, 陶千冶^{1,2,3}, 旺 罗²

(1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院大学测试中心分子化石实验室, 北京 100049)

摘要: 为比较网袋埋藏和自然环境中凋落物分解速率的差异, 探讨网袋在凋落物早期分解过程中对分解速率的影响, 选取位于北京市东灵山的暖温带落叶阔叶林为固定样地, 于 2007 年 11 月至 2008 年 11 月定期收集网袋和自然分解早期凋落物, 并收集分解后期近 10 年的样品作为对比, 测定其红度 (a^*)、黄度 (b^*) 和亮度 (L^*)。结果表明, 网袋中的凋落物和自然环境中的凋落物的 a^* , b^* , L^* 均随分解时间的推移而逐渐降低, 颜色变化主要发生在分解的第 1 年, 分解后期颜色逐渐趋于稳定; 分解早期, 对 a^* , b^* , L^* 而言, 三者间呈极显著的正相关, a^* , b^* , L^* 与分解时间之间均呈显著负相关; 网袋中凋落物的颜色值波动较大, 分布离散, 规律性较差; 分解开始, 网袋中的凋落物与自然环境中的凋落物的颜色接近, 随着时间的推移, 差别逐渐增大, 凋落物的颜色变化是色素等有机质分解的外在表现, 时间较长时, 网袋微环境会抑制凋落物分解, 使其分解速率低于自然样品。因此, 利用网袋法研究凋落物分解过程和分解速率, 应当考虑网袋的存在对分解的影响以使结果更加精准。

关键词: 凋落物; 自然环境; 网袋; 落叶阔叶林; 分解作用

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2020)06-0001-08

Comparison on Early Decomposition Process of Forest Litter from Litter Bag and Natural Environment

GU Yong-jian^{1,2,3}, LI Yu-mei^{1,2,3}, TAO Qian-ye^{1,2,3}, WANG Luo²

(1. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Laboratory of Molecular Fossils of Testing Centre, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Permanent sample plots were established in 2007 in warm temperate deciduous broad-leaved forest in Donglingshan Mountain, Beijing for studying early decomposition of litter. From November 2007 to November 2008, samples from litter bag and natural environment were collected regularly and their color values (a^* , b^* , L^*) were measured. Samples from 2009 to 2018 were collected from the same sample plots for comparison. The results indicated a^* , b^* , L^* gradually decreased with the increase of time. Color change of litter mainly occurred in the first year of decomposition, and then gradually stable in the later stage. At the early stage of decomposition, there were significantly positive correlations among three indexes, and significantly one among decomposition years. At early stage, color was similar of samples from litterbag and natural environment, but later there were difference between them at later stage.

Key words: litter; natural environment; litterbag; deciduous broad-leaved forest; decomposition

收稿日期: 2020-04-18; 修回日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077412, 41430531, 41272207), 中科院先导专项子课题(XDA20040102, XDA05130402)

作者简介: 谷永建, 硕士研究生, 从事第四纪环境变化工作; E-mail: gu Yongjian14@mailsucas.ac.cn。通信作者: 李玉梅, 副教授, 从事地球化学、地球生物学和第四纪地质学方面的研究; E-mail: liym@ucas.ac.cn。

作为地球系统碳循环的重要过程,凋落物分解是全球气候变化研究的热点之一^[1-4]。凋落物分解的研究方法主要有网袋法^[5]、小容器法^[6]和同位素法^[7]等。自20世纪60年代起,网袋法在凋落物分解研究中得到广泛使用^[8-10]。该法将凋落物称量后放入分解袋中,置于土壤表层和地表凋落物之间,定期取回网袋^[11],“追踪”凋落物分解进程和养分释放过程。网袋法的推广和使用,能动态监视土壤动物和微生物的群落变化^[12],大大促进了凋落物分解过程的定量化研究^[13-14],还可为优化生态环境和人工造林提供决策依据^[15]。

然而,由于网袋的存在,网袋微环境与自然环境的分解速率存在差异:网袋本身会限制大型土壤动物的进出,从而降低土壤动物对凋落物分解的作用^[12];网袋内部可能形成一个相对于外部环境有所差异的微环境,使得凋落物分解过程发生改变^[6],小孔径的网袋造成的微环境可能导致较高的分解率^[17]。目前,网袋法作为模拟自然环境中凋落物分解的方法在森林生态研究中应用普遍^[11,14],但其与真实自然环境中凋落物分解的比较案例相对较少^[18],网袋对凋落物分解的影响尚不十分明确。

分别测定网袋样品和自然样品在分解过程的失重率是直接、有效地获知二者差异的方法^[10,13]。但自然凋落物分布在整个凋落区,且可能因风和降水过程等发生移动。若使用失重法,需要将研究区内某一分解时间的所有凋落物进行称量,工作量大,可操作性差。有必要选择一种简单、高效、易操作、能有效指示凋落物分解程度的对比指标。

凋落物的颜色受控于各种色素物质(如叶绿素、类胡萝卜素、花青素等)及其相对含量^[19-20]。在分解作用早期,凋落物的颜色变化明显,色素浓度不断下降^[21]。通过对植物颜色的定量化研究,红度(a^*)、黄度(b^*)和亮度(L^*)三种颜色指标与色素含量的关系已经比较明确:

(1) a^* :与叶绿素含量负相关,与花色素苷含量正相关^[22]。叶片成熟凋落时,叶绿素大部分已经分解^[23],对凋落物颜色影响较小,而花色素苷对颜色影响较大。 a^* 指示了花色素苷的含量。

(2) b^* :与类胡萝卜素等黄色色素有关。类胡萝卜素含量稳定,降解速率低,在叶片衰老时取代叶绿素,导致凋落物呈黄色^[19,23-24]。 b^* 指示了类胡萝卜素等色素的含量。

(3) L^* :在凋落物的分解过程中,有机质含量下降、无机成分增加^[25]、腐殖质逐渐形成和积累^[26],亮度变弱, L^* 减小。 L^* 直接反映了有机质的分解程度,可作为腐殖质相对含量的指标。

因此, a^* 、 b^* 和 L^* 作为定量化的颜色值,能够准确描述凋落物在分解过程中的颜色,进而表征凋落物的分解程度^[27],其中, a^* 、 b^* 和 L^* 分别指示了凋落物花色素苷、类胡萝卜素和总有机质的分解情况。

基于上述考虑,本文尝试以 a^* 、 b^* 和 L^* 为基本指标,通过分析北京东灵山暖温带落叶阔叶林新鲜凋落物早期分解过程中颜色的变化,考察网袋埋藏和自然埋藏状态下凋落物的分解速率,以期认识网袋埋藏对凋落物早期分解过程的影响,为定量研究凋落物的分解过程、精确探知地球系统碳循环服务。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

东灵山(39°48'~40°00' N, 115°24'~115°36' E)位于北京市门头沟区,距北京城区122 km,属太行山系,为小五台山向东南延伸的支脉,主峰海拔2303 m,是北京市最高峰。该地区属于暖温带大陆季风性气候区,四季分明,但春、秋短,夏、冬长,冬季寒冷多风且干燥,夏季温热多雨,秋季晴朗少风,冷暖适中但雨量偏少。年均气温在5~11°C,7月最热,平均气温达到18~25°C;1月最冷,平均气温在-10~-4°C;3-4月气温急剧上升,10-11月骤然下降,全年无霜期为195 d。年降水量为500~650 mm,多集中在夏季,6-8月的降雨量约占全年降水总量的74%,春、秋季降水量分别占10%和14%,冬季降水量最少,约占2%。地带性典型植被为暖温带落叶阔叶林,以落叶栎类为主。土壤类型主要为棕色森林土、褐色土和亚高山草甸土^[28]。

研究区位于北京东灵山一次生林东坡,海拔在1500~1600 m,区内主要植被有白桦 *Betula platyphylla*, 辽东栎 *Quercus wutaishanica* 和蒙古栎 *Q. mongolicus* 等,有少量色木槭 *Acer mono* 和胡桃楸 *Juglans mandshurica* 伴生。

研究区海拔较高, 人迹罕至, 有利于试验的长时间进行, 避免了人类活动的干扰。

1.2 样品采集和处理

1.2.1 自然样品 在研究区选取 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的永久固定样地作为 1 号样地。将凋落物自上到下分为 F, R, H, S 共四层, 依次为当年的新鲜凋落物、半破碎的近年凋落物、破碎程度较高的陈年凋落物和土壤。各层区分明显, 其中, F 层即新鲜凋落物层为本次试验的研究对象。

于 2007 年 11 月至 2008 年 11 月, 定期采集凋落物样品。为保证样品具有代表性, 采用五点取样法, 即: 每次采样时随机设置 A, B, C, D, E 五个采样点, 每个采样点在 $< 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 范围内分别采集 3 份 F 层凋落物, 等量混合后作为该点的样品。将五个点的样品等比例高度混合, 装入样品袋并立即封口, 用保温箱带回实验室, 在 4°C 冰箱内暂时保存备用。

于 2007 年初冬、植物全部落叶后的 11 月 24 日首次采样。当日 F 层凋落物的物理性状如下: 新鲜或轻微变色的未分解凋落物, 呈完整片状, 颜色枯黄, 干燥易碎, 是当年脱落的新鲜凋落物。

为方便度量, 以此日为本研究的时间起点, 开始计算分解时间。于凋落物分解的第 67 天、第 133 天、第 201 天和第 323 天, 即 2008 年 1 月 30 日、2008 年 4 月 4 日、2008 年 6 月 11 日和 2008 年 10 月 11 日分别用同样的方法采集 F 层样品。

2008 年夏、秋季节采集样品时, 肉眼观察并筛选出新凋落物, 用镊子剔除, 以免新凋落物输入影响颜色测定结果。

1.2.2 网袋样品 选取与上述样地紧邻的两块 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 样地分别作为 2 号样地和 3 号样地。3 块样地的植被类型、地理环境高度一致。

2007 年 11 月 24 日, 用多点网格采样法收集 3 号样地的 F 层凋落物, 混合均匀后分装入尼龙网袋 ($26\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, 孔径 $1.1\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$) 中, 每袋装 F 层凋落物 20 g。

将装有凋落物的网袋随机埋入 2 号样地中的新鲜凋落物下, 使网袋微环境与自然环境初始值尽可能保持相同。为方便对照, 后续采集自然状态 F 层凋落物的同时, 每次随机选取 2~5 个网袋, 取回网袋样品, 装入样品袋中带回实验室, 在 4°C 冰箱内暂时保存备用。

此后, 于 2009 年 11 月、2010 年 11 月、2013 年 4 月、2014 年 11 月和 2018 年 4 月对网袋样品进行了采集, 同样每次随机选取 2~5 个网袋。于 2018 年 4 月同时采集网袋周边自然环境下土壤表层凋落物样品。王瑾等应用网袋法对东灵山不同植物的凋落物分解时间模拟得出平均周转期为 11.64 年^[29-30], 因此, 基本可以判断土壤表层凋落物至此已分解了 10 年左右, 为网袋样品同期凋落物, 可以与网袋埋藏样品进行对比。

1.3 凋落物颜色测定

凋落物颜色由日本 KONICA MINOLTA 公司生产的 CM-600d 分光测色计测量, 使用 $L^*a^*b^*$ 色空间。 $L^*a^*b^*$ 色空间是目前最普遍使用的色空间之一, 其中 L^* 表示亮度, 在 0 (黑) ~ 100 (白) 之间变化; a^* 表示红度, $+a^*$ 为红色方向 (0 ~ 60), $-a^*$ 为绿色方向 (-60 ~ 0); b^* 表示黄度, $+b^*$ 为黄色方向 (0 ~ 60), $-b^*$ 为蓝色方向 (-60 ~ 0)。测试参数: CIE D65 光源 (色温为 6 504 K 的正常日光), 10° 观察视角。

样品在 70°C 下烘干 1 h 后分别粉碎, 对测色计进行系统校正后, 在保证背景光源恒定的情况下, 选取凋落物较为平整的区域手动测量 30 次, 仪器自动得出测量平均值。测量精度为 0.01, 误差为 $\pm 2\%$ 。

凋落物分解过程中颜色不断发生变化, 因此本研究试通过定量颜色值的变化来指示凋落物分解。新鲜凋落物的 a^* , b^* 和 L^* 较高, 分解一段时间后凋落物的 a^* , b^* 和 L^* 降低。

1.4 数据处理方法

数据分析和图表绘制使用 SPSS 22.0 和 OriginPro 2015 完成。对不同分解时间的自然样品和网袋样品的 a^* , b^* 和 L^* 分别进行对数拟合和指数拟合, 得到各自拟合回归方程; 同时对凋落物分解早期的三个颜色指标进行 Pearson 相关分析, 得到相关系数矩阵。

2 结果与分析

2.1 自然环境中凋落物的颜色变化

在自然埋藏环境中,地表凋落物不同取样时间的颜色变化如图1。由图1可知, a^* 、 b^* 和 L^* 三个颜色指标均随着时间的推移而减小,其中,以 L^* 的下降幅度较大,其次是 b^* , a^* 的下降幅度较小。分解第1年, a^* 的变化范围为5.51~8.84, b^* 为11.95~21.81, L^* 为32.17~50.87。分解10年后,样品的 a^* 、 b^* 和 L^* 分别为4.94、10.99和36.69。

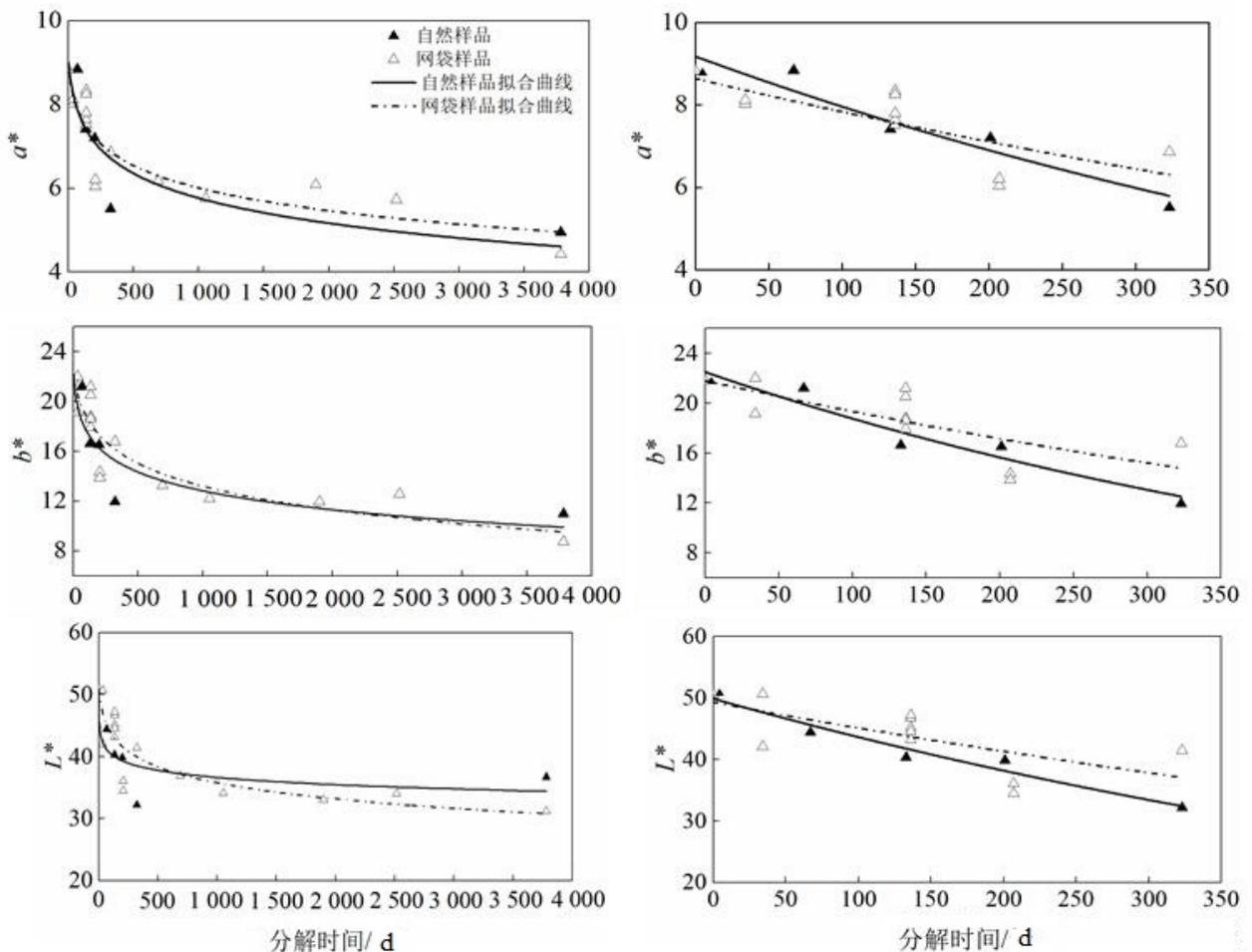


图1 网袋样品和自然样品凋落物颜色值及其变化拟合曲线

Figure 1 a^* , b^* and L^* values of samples from litter bag and natural environment and their fitting curves

在10年的分解期内,对自然环境中的样品颜色变化的回归分析显示,对数拟合曲线更符合凋落物样品的颜色变化趋势,其拟合结果如下:

$$a^* = 11.8891 - 0.8835 \ln(t - 25.9724) \quad (R^2 = 0.8093, P < 0.01) \quad (1)$$

$$b^* = 28.2028 - 2.2199 \ln(t + 15.2488) \quad (R^2 = 0.7984, P < 0.01) \quad (2)$$

$$L^* = 48.2117 - 1.6749 \ln(t - 0.1937) \quad (R^2 = 0.7261, P < 0.01) \quad (3)$$

式中, t 为分解时间(d),下同。

凋落物颜色的变化主要发生在分解的第1年(图1)。在分解早期的第1年内,尽管 a^* 、 b^* 和 L^* 略有波动,但在整个研究期内凋落物的颜色变化速率相对稳定。凋落物的颜色在第1年中更趋向于指数变化。进一步分析中,对自然环境中凋落物的 a^* 、 b^* 和 L^* 三个颜色指标随分解时间的变化进行指数拟合,分别得到:

$$a^* = 9.178 1e^{-0.001 4t} \quad (R^2 = 0.923 0, P < 0.01) \quad (4)$$

$$b^* = 22.489 6e^{-0.001 8t} \quad (R^2 = 0.932 6, P < 0.01) \quad (5)$$

$$L^* = 49.845 9e^{-0.001 3t} \quad (R^2 = 0.959 5, P < 0.01) \quad (6)$$

由指数拟合公式可以看出, a^* , b^* 和 L^* 与分解时间均呈极显著的负相关。

2.2 网袋微环境中凋落物的颜色变化

将网袋中不同时间凋落物的颜色值在自然环境凋落物的颜色变化趋势图上投点, 发现网袋中凋落物在分解早期的颜色值虽然分布比较离散, 高低值波动较大, 但与自然状态下的凋落物颜色变化趋势一致。网袋中凋落物的颜色整体上仍表现为随时间的增加逐渐下降的趋势(图 1)。在分解的第 1 年, a^* 的变化范围为 6.04 ~ 8.34, b^* 为 13.86 ~ 22.02, L^* 为 36.09 ~ 50.87。分解 10 年后, 其网袋样品的颜色值分别下降到 4.43, 8.74 和 31.23。同样对 10 年分解期的网袋样品颜色值进行了对数拟合:

$$a^* = 11.575 4 - 0.802 5 \ln(t+31.323 0) \quad (R^2 = 0.796 4, P < 0.01) \quad (7)$$

$$L^* = 62.116 1 - 3.801 2 \ln(t+19.008 3) \quad (R^2 = 0.740 8, P < 0.01) \quad (8)$$

$$b^* = 32.804 4 - 2.821 7 \ln(t+42.161 0) \quad (R^2 = 0.818 8, P < 0.01) \quad (9)$$

对分解第 1 年的网袋凋落物颜色值分别进行指数拟合, 得到分解趋势线。网袋凋落物颜色值的拟合公式如下:

$$a^* = 8.641 0e^{-0.001 0t} \quad (R^2 = 0.567 4, P < 0.01) \quad (10)$$

$$b^* = 21.809 0e^{-0.001 2t} \quad (R^2 = 0.520 9, P < 0.01) \quad (11)$$

$$L^* = 49.270 4e^{-0.000 8t} \quad (R^2 = 0.435 1, P < 0.01) \quad (12)$$

由第 1 年的拟合结果显示, a^* , b^* , L^* 观测值与分解时间之间的相关性均达极显著水平, 且 a^* 与分解时间之间的相关系数 $> b^*$ 与分解时间之间的相关系数 $> L^*$ 与分解时间之间的相关系数。

2.3 自然环境和网袋微环境凋落物分解早期颜色变化对比

分解早期, 由 Pearson 相关分析结果显示, 无论是网袋样品还是自然环境样品, 其 a^* , b^* , L^* 三个颜色指标之间呈极显著的正相关, 表明同组样品颜色变化具有一致性和同步性, 即凋落物的 L^* 高时, 其 a^* 和 b^* 也高(表 1)。 L^* 与 a^* , b^* 的显著性相关表明, 凋落物色素的分解趋势与总有机质的分解趋势相一致。因此, 在未来的工作中, 可以考虑用凋落物 L^* 的变化模式代表总体颜色的变化以使问题简化。

表 1 网袋样品和自然样品 a^* , b^* , L^* 的相关分析
Table 1 Correlation analysis on a^* , b^* and L^* of samples from litter bag and natural environment

r	a^*_M	b^*_M	L^*_M	r	a^*_N	b^*_N	L^*_N
a^*_M	1			a^*_N	1		
b^*_M	0.961 5**	1		b^*_N	0.994 7**	1	
L^*_M	0.926 7**	0.967 5**	1	L^*_N	0.940 2**	0.958 6*	1

网袋微环境凋落物颜色值主要分布在自然环境凋落物分解拟合曲线两侧, 与自然环境凋落物颜色值变化趋势一致, 随着时间推移而逐渐减小。分解初期, 网袋微环境和自然环境中的凋落物颜色值较为接近, 随着分解时间的增加, 两者的差异逐渐增大(图 1), 网袋微环境中的凋落物色素变化速率逐渐低于自然环境中的。

网袋中凋落物的 a^* 在分解过程中高于同期自然环境凋落物的 a^* , 表明花色素苷分解速率较低。网袋中凋落物的 b^* 的高值指示类胡萝卜素等黄色色素分解较慢。网袋中凋落物的 L^* 的高值则说明网袋微环境中凋落物有机质总体分解速率较低。 a^* , b^* 和 L^* 三个颜色指标都指示分解早期网袋凋落物的有机质(色素)分解速率要低于自然环境中的。网袋埋藏可能导致凋落物分解速率降低。

2.4 自然环境和网袋微环境凋落物分解后期的颜色变化对比

经过 10 年的分解, 自然样品的 L^* 大于分解 1 年后的 L^* 。 L^* 主要反映了腐殖质的相对含量^[26], 由于本研究中利用了土壤表层的凋落物样品代表自然环境下分解了 10 年的凋落物, 样品贴近土壤可能导致土壤的混入使得

腐殖质相对含量下降,从而使 L^* 增加,因此测得土壤表层的凋落物样品的 L^* 高于样品分解1年后的 L^* 。对表层土壤的颜色测定发现,土壤的颜色值除 a^* (4.71)略小于10年分解后的自然样品的 a^* 外, b^* (11.73)和 L^* (38.99)均明显高于自然样品。可以推断自然样品的实际 L^* 应低于32.17, a^* 和 b^* 也同样低于测定值。

从10年的分解趋势线上可以看出,自然样品和网袋样品的颜色值在第1年迅速下降,在之后9年的时间里缓慢下降。自然样品的 L^* 在1年后已经下降到32.17,只比经过10年分解后的网袋样品的 L^* (31.23)略高, a^* 和 b^* 的变化与之相同。由于网袋对凋落物分解的抑制作用,在分解过程中,自然样品的颜色值可能先达到到相对稳定值,网袋样品的颜色值逐渐向这一稳定值靠近,最终达到与自然样品同样的颜色值。因此,经过10年的分解后,自然样品的实际颜色值与网袋样品的颜色值相近,或可能低于网袋样品的颜色值。

3 讨论

凋落物分解的影响因素主要包括凋落物基质成分、气候、微生物和土壤动物等^[1-2,12,31],其中,植被的固有特性即凋落物基质成分是主控因素,不同类型的植被凋落物分解速率差异明显^[5]。本研究中,网袋和自然环境中的凋落物成分基本相同,可将其排除。因此,物理化学条件、微生物以及土壤动物可能是影响网袋和自然环境中的凋落物色素分解速率差异的主要因素,具体包括湿度、土壤动物和微生物等。

3.1 湿度

湿度(降水)是影响凋落物分解的重要气候因子^[32]。宋新章等对中国东部气候带凋落物分解特征的研究结果表明,降水量是影响中国东部凋落物分解速率的首要气候因子^[33]。凋落物的分解主要发生在夏季雨水多期。降水一方面通过淋溶作用,造成可溶有机质和易分解碳水化合物的淋失和分解,降水量越大,表层凋落物的解体就越快^[34]。另一方面,降水通过影响微生物的活动和酶活性间接影响凋落物的分解^[32,34]。

与自然样品相比,网袋的保护作用导致袋内凋落物结构稳定,降水的直接淋溶和破碎效果降低^[35],水溶性物质的淋失强度下降,凋落物的解体速率减缓,色素的分解速率下降。花青素作为一类水溶性植物色素^[36],降水有助于其直接从凋落物中流失,而网袋对降水的阻碍使得水溶性色素的流失速率降低, a^* 下降变慢。其他水溶性色素的降解速率也存在不同程度的下降。

降水影响土壤湿度,而湿度直接影响土壤动物的活性。一定的湿度能够显著增加生物多样性和丰富群落组成^[37],水分不足使分解者种群数量下降、活性降低^[38]。由于水分不易进入网袋造成内部湿度变低,微生物可利用水资源不足,活性下降,对色素等有机质分解效率减缓,不利于凋落物的分解,使网袋样品的分解速率低于自然环境样品,导致颜色变化速率降低,表现为 a^* , b^* , L^* 变化较慢。

3.2 土壤动物和微生物

土壤生物在分解早期的作用小于气候,但也是至关重要的^[34]。土壤动物(蚂蚁、蚯蚓等)主要对凋落物进行破碎,使凋落物表面积增大,属于物理性分解,破碎产生的凋落物碎屑容易被分解者利用;色素等有机质在分解者(主要为真菌、细菌)及各种酶系统作用下发生生物降解,复杂的有机化合物(色素)被分解为简单的小分子和腐殖质,使凋落物颜色发生变化,属于化学分解^[11,14,17,25]。土壤动物的破碎尽管只在很小程度上改变凋落物的颜色,但形成的小颗粒有助于土壤微生物的进一步分解。土壤生物在凋落物色素变化中扮演重要角色。微生物活动和酶活性是影响凋落物有机质和色素分解的最直接和关键因子,微生物活动强则色素分解速率快^[25]。

分解开始阶段,土壤动物能够进入网袋对凋落物进行破碎,微生物作用较小^[11],网袋样品和自然样品色素分解差异小表现不明显。随着时间的推移,网孔的阻碍作用逐渐积累,并且网孔可能被外界物质所覆盖或者网孔变小,部分土壤动物不能进入网袋,凋落物的破碎作用减弱,使得微生物对小颗粒凋落物的可利用效率下降。同时网孔的遮蔽或变小,使得与外界的营养交换产生变化,氧气不充足。网孔越小,通气性愈差。营养元素和氧气的缺乏导致凋落物微生物活性降低,群落功能多样性下降^[34]。凋落物为土壤动物和微生物提供能量,群落结构越复杂,活性越高,则需要消耗更多能量和养分,对凋落物的分解越快。网袋阻碍土壤动物进入以及对微生物活动的减弱都使得凋落物的消耗下降,从而使网袋样品色素分解慢于自然样品,颜色变化差距逐渐增大。

总之, 网袋的存在既削弱了降水对凋落物的淋溶破碎, 同时导致袋内湿度降低, 在分解过程中孔径变小又阻止了土壤动物的进入, 使凋落物的破碎速度下降, 小颗粒有机质供应不足。湿度不足和与外界交换的不畅通使得微生物活性和数量受到影响, 在一定程度上限制了微生物活性和降低了酶活性, 对凋落物色素等有机质的分解变慢^[35], 造成网袋凋落物颜色相对于自然环境变化较小。由于网袋在凋落物早期分解过程中的抑制作用, 根据网袋凋落物早期分解过程预估的周转期可能要大于凋落物的实际周转期^[29]。

另外, 网袋将袋内和袋外两种环境分开, 分解初期气候条件和生物作用相同, 随着时间的延长, 不同网袋逐渐形成各自内部的微环境, 使得各自的分解模式产生差异^[35], 从而导致凋落物颜色与时间的相关性较差(图 1)。在外部环境相同的情况下, 微环境的影响不容忽视^[17]。不同网袋内逐渐形成相对稳定的微环境, 使得网袋内温度和湿度发生改变, 生物作用产生变化, 较高温度和湿度导致较高的分解速率^[16]。微环境的不同造成色素分解差异明显, 这可能是导致本次研究中网袋微环境中凋落物颜色值分布离散、规律性差的原因。

4 结论

凋落物分解过程中, 颜色指标 a^* , b^* , L^* 随着时间的增加逐渐降低, 三者显著正相关。 a^* , b^* , L^* 可以分别指示凋落物花色苷、类胡萝卜素和总有机质的分解速率。

分解早期, 网袋微环境与自然环境中凋落物的颜色值差异小, 随分解时间的增加差异逐渐增大。总体上, 网袋样品的色素分解速率低于自然环境样品的。这可能是网袋的存在阻碍了降水淋溶、降低网袋内样品湿度、阻碍了土壤动物的活动及抑制土壤微生物的繁殖等因素造成的。经过 1 年的分解之后, 凋落物的颜色值变化减慢, 颜色逐渐趋于稳定。

作为野外测定森林凋落物分解速率的常用方法, 网袋对凋落物的分解具有一定的抑制作用, 在利用网袋进行凋落物分解研究时应考虑其影响。

参考文献:

- [1] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [2] CORNELISSEN J H C, BODEGOM P M V, AERTS R, *et al.* Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes[J]. *Ecol Lett*, 2007, 10(7): 619-627.
- [3] PRESCOTT C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 101(1-3): 133-149.
- [4] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [5] CORNELISSEN J H C. An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types[J]. *J Ecol*, 1996, 84(4): 573-582.
- [6] DITTMER S, SCHRADER S, GAJU M, *et al.* Long term effects of soil compaction and tillage on Collembola and straw decomposition in arable soil[J]. *Pedobiol-Int J Soil Biol*, 2000, 44(3): 527-538.
- [7] KAMMER A, SCHMIDT M W I, HAGEDORN F. Decomposition pathways of ¹³C-depleted leaf litter in forest soils of the Swiss Jura[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1-3): 395-411.
- [8] BOCOCK K L, GILBERT O J W. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions[J]. *Plant Soil*, 1957, 9(2): 17-185.
- [9] CAÇADOR I, COSTA A L, VALE C. Carbon storage in Tagus salt marsh sediments[J]. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 2004, 4(2-3): 701-714.
- [10] RUBIO G, CHILDERS D L. Controls on herbaceous litter decomposition in the estuarine ecotones of the Florida Everglades[J]. *Estuar Coast*, 2006, 29(2): 257-268.
- [11] MUELLER K E, HOBBI E S E, CHOROVER J, *et al.* Effects of litter traits, soil biota, and soil chemistry on soil carbon stocks at a common garden with 14 tree species[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 123(3): 313-327.
- [12] 包剑利, 殷秀琴, 李晓强, 等. 长白山牛皮杜鹃凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3320-3328.
- [13] 林宇, 张勇, 黄秀勇, 等. 滨海沙地尾巨桉人工林凋落物及其分解[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 11-14.
- [14] OSONO T, TAKEDA H. Organic chemical and nutrient dynamics in decomposing beech leaf litter in relation to fungal ingrowth and succession

- during 3-year decomposition processes in a cool temperate deciduous forest in Japan[J]. *Ecol Res*, 2001, 16 (4): 649–670.
- [15] 江萍, 刘勇. 不同密度华北落叶松叶凋落物年际分解动态研究[J]. *林业资源管理*, 2013 (1): 38–44.
- [16] KNACKER T, FÖRSTER B, RÖMBKE J, *et al.* Assessing the effects of plant protection products on organic matter breakdown in arable fields-litter decomposition test systems[J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35 (10): 1269–1287.
- [17] PARIS C I, POLO M G, GARBAGNOLI C, *et al.* Litter decomposition and soil organisms within and outside of *Camponotus punctulatus* nests in sown pasture in Northeastern Argentina[J]. *App Soil Ecol*, 2008, 40 (2): 271–282.
- [18] KAMPICHLER C, BRUCKNER A. The role of microarthropods in terrestrial decomposition: a meta-analysis of 40 years of litterbag studies[J]. *Biol Rev*, 2009, 84 (3): 375–389.
- [19] 胡敬志, 田旗, 鲁心安. 枫香叶片色素含量变化及其与叶色变化的关系[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35 (10): 219–223.
- [20] 聂庆娟, 史宝胜, 孟朝, 等. 不同叶色红栎叶片中色素含量, 酶活性及内含物差异的研究[J]. *植物研究*, 2008, 28 (5): 599–602.
- [21] BIANCHI T S, FINDLAY S. Decomposition of Hudson estuary macrophytes: photosynthetic pigment transformations and decay constants[J]. *Estuar Coast*, 1991, 14 (1): 65–73.
- [22] 朱书香, 杨建民, 王中华, 等. 4种李属彩叶植物色素含量与叶色参数的关系[J]. *西北植物学报*, 2009 (8): 1663–1669.
- [23] LEE D W, O'KEEFE J, HOLBROOK N M, *et al.* Pigment dynamics and autumn leaf senescence in a New England deciduous forest, eastern USA[J]. *Ecol Res*, 2003, 18 (6): 677–694.
- [24] BISWAL B. Carotenoid catabolism during leaf senescence and its control by light[J]. *J Photochem Photobiol B: Biology*, 1995, 30 (1): 3–13.
- [25] SHAFIQUE S, SIDDIQUI P J A. Changes in water, organic, inorganic and pigments contents in mangrove leaves (*Avicennia marina*) during decomposition under different field (Sandspit backwaters, Karachi) and laboratory conditions[J]. *Ind J Geo Marin Sci*, 2015, 44 (1): 110–114.
- [26] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析[J]. *地理学报*, 2001 (4): 390–400.
- [27] CORNELISSEN J H C, PEREZ-HARGUINDEGUY N, GWYNN-JONES D, *et al.* Autumn leaf colours as indicators of decomposition rate in sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.)[J]. *Plant Soil*, 2000, 225 (1): 33–38.
- [28] 江洪, 黄建辉. 东灵山植物群落的排序, 数量分类与环境解释[J]. *植物学报*, 1994, 6 (7): 539–551.
- [29] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较[J]. *植物生态学报*, 2001, 25 (3): 375–380.
- [30] WANG L X, WANG J, HUANG J H. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zones[J]. *植物学报 (英文版)*, 2003, 45 (4): 399–407.
- [31] 王利峰, 和润莲, 杨林, 等. 川西高山林线交错带土壤动物对岷江冷杉和高山杜鹃凋落物分解的贡献[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (11): 3689–3697.
- [32] STEINWEG J M, DUKES J S, WALLENSTEIN M D. Modeling the effects of temperature and moisture on soil enzyme activity: linking laboratory assays to continuous field data[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 55: 85–92.
- [33] 宋新章, 江洪, 余树全, 等. 中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解试验[J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (03): 537–542.
- [34] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42 (4): 93–100.
- [35] PÉREZ-SUÁREZ M, ARREDONDO-MORENO J T, HUBER-SANNWALD E. Early stage of single and mixed leaf-litter decomposition in semiarid forest pine-oak: the role of rainfall and microsite [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108 (1): 245–258.
- [36] BUENO JM, SÁEZ-PLAZA P, RAMOS-ESCUADERO F, *et al.* Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Part II: chemical structure, color, and intake of anthocyanins[J]. *Critic Rev Anal Chem*, 2012, 42 (2): 126–151.
- [37] 吴廷娟. 全球变化对土壤动物多样性的影[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 (2): 581–588.
- [38] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 (11): 3300–3310.