

树叶凋落物在受酸性矿山废水污染溪流中的分解

童晓立¹, 颜 玲¹, 赵 颖², 林初夏¹, 韩翠香¹, 刘若思¹, 刘丽娟¹

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学理学院, 广州 510642)

摘要: 为了解华南地区酸性矿山废水对溪流中树叶分解的影响, 在广东省大宝山矿区附近的 1 条受酸性矿山废水污染 (pH 值为 2.7 ~ 3.4 且富含多种重金属元素) 的 3 级溪流中, 利用 2 种孔径 (5mm 的网袋和 0.1mm 的布袋) 的分解网袋对 2 种树叶 (人面子和蒲桃) 进行了为期 101d 的树叶分解研究。结果表明, 人面子树叶网袋和布袋中的树叶干重剩余率分别为 39 % 和 48 %, 而蒲桃树叶网袋和布袋中的干重剩余率仍保持较高的水平, 分别为 61 % 和 70 %。根据指数衰减模型计算出树叶分解的半衰期, 人面子树叶在网袋和布袋中的分解半衰期分别为 57d 和 69d, 而蒲桃树叶则分别为 144d 和 217d。蒲桃树叶的分解速率明显比人面子树叶慢。在网袋中定殖的底栖动物主要是集食者, 其中优势类群为摇蚊幼虫, 占底栖动物个体总数的 99 %。摇蚊种群在网袋中的数量波动对 2 种树叶分解速率的影响并不明显。结果表明, 受酸性矿山废水的影响, 底栖动物群落的多样性大为减少, 同时由于各种金属氧化物在树叶表面的不断沉淀, 使树叶处于缺氧状态, 抑制了微生物的活动, 导致树叶分解速率大为降低。

关键词: 华南地区; 酸性矿山废水; 树叶分解; 底栖动物

文章编号: 1000-0933(2006)12-4033-06 中图分类号: Q178, Q958 文献标识码: A

The breakdown of leaf litter in a stream impacted by acid mine drainage

TONG Xiao-Li¹, YAN Ling¹, ZHAO Ying², LIN Chu-Xia¹, HAN Cui-Xiang¹, LIU Ruo-Si¹, LIU Li-Juan¹ (1. College of Resources & Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China; 2. College of Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4033 ~ 4038.

Abstract: To investigate the effect of acid mine drainage on organic matter processing, we measured leaf breakdown in a third order stream in South China. We used leaves of *Dracontomelon duperreanum* (Anacardiaceae) and *Syzygium jambos* (Myrtaceae) allocated into coarse (5mm) and fine (0.1mm) mesh bags. The stream was polluted by acid mine drainage with low pH (2.7 ~ 3.4) and heavy metal-rich water drained from the Dabaoshan Mine of Guangdong, China. After 101 days in the stream, 39 % (coarse-mesh bags) to 48 % (fine-mesh bags) of *D. duperreanum* initial mass still remained in the stream, whereas for *S. jambos* the values were 61 % (coarse-mesh bag) and 70 % (fine-mesh bag). The time required for a 50 % loss of leaf litter, based on the exponential model, were 57 days (coarse-mesh bag) and 69 days (fine-mesh bag) for *D. duperreanum*, and 144 days (coarse-mesh bag) and 217 days (fine-mesh bag) for *S. jambos*, respectively. The decomposition rate of *D. duperreanum* leaves was significantly faster than that of *S. jambos*. Macroinvertebrates colonizing the coarse-mesh bags consisted mainly of collector-gatherers, of which Chironomidae larvae were numerically dominant in and accounted for more than 99 % of the total macroinvertebrate individuals. The number of chironomids in the bags fluctuated along time, but no relationship was observed

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170121 和 30270279); 教育部留学归国人员科研启动基金资助项目; 教育部科学技术研究重点资助项目 (205111) 和广东省科技厅社会发展计划资助项目 (2005A30402006)

收稿日期: 2006-01-10; **修订日期:** 2006-09-10

作者简介: 童晓立 (1960 ~), 男, 浙江人, 博士, 教授, 主要从事蜉蝣目昆虫分类和淡水生态研究. E-mail: xtong@scau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30170121 and 30270279); SRF for ROCS, SEM; The Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 205111) and The Social Development Planning Program of Department of Science & Technology of Guangdong Province (No. 2005A30402006)

Received date: 2006-01-10; **Accepted date:** 2006-09-10

Biography: TONG Xiao-Li, Ph.D., Professor, mainly engaged in taxonomy of Ephemeroptera and freshwater ecology.

between number of chironomids and mass losses, which suggests that the contribution of chironomids to the breakdown of leaf litter was thus unimportant. Our results suggest that the macroinvertebrate biodiversity can be seriously reduced in the stream impacted by acid mine drainage and the decomposition rate of leaf litter in the stream can be slower, mainly as a result of inhibition of microbial activity due to hypoxia with the deposition of metal oxides on leaf surface.

Key words: South China; acid mine drainage; litter decomposition; macroinvertebrates

煤炭和金属等矿产资源在开采过程中,大量被遗弃的含金属硫化物(主要为黄铁矿 FeS_2)的废矿石,经过氧化、淋溶,极易形成酸性矿山废水(Acid mine drainage, AMD)。酸性矿山废水因其强酸性和富含重金属以及各种金属氧化物沉淀等特点,容易造成矿区周围水体的严重污染,引起水生生物的大量死亡,从而导致生态环境和水域生态系统的严重破坏^[1~4]。树叶凋落物是溪流生态系统中能量的主要来源,树叶分解是溪流中能量循环的一个主要环节^[5~7]。树叶分解速率经常被作为衡量河溪健康及其生态系统完整性的重要参数之一^[8~11]。据报道在温带地区溪水酸化对树叶分解具有显著影响,原因是低 pH 值的溪水抑制了微生物的活性,降低了底栖动物的多样性,从而延缓了树叶分解的速率^[12~15]。但在热带亚热带地区酸性矿山废水对树叶分解过程的影响却知之甚少。鉴于此,本研究以地处亚热带地区的广东大宝山矿附近的一条受大宝山矿酸性矿山废水污染的 3 级溪流为研究地点,利用分解网袋法研究比较了酸性矿山废水以及不同分解袋类型对 2 种树叶分解速率的影响。旨在为将来开展受损河道与废矿山的生态恢复和治理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地点概况

广东大宝山矿(北纬 $24^{\circ}31'37''\text{N}$,东经 $113^{\circ}42'49''\text{E}$)是一座大型多金属伴生露天矿床。矿区南侧的山谷曾修建了一座拦泥坝,目的是阻止从山顶排土场不断排出的废矿土移向下游河段。由于矿区水土流失严重,拦泥库早已被废矿土填满,大量富含重金属的强酸性矿水常年漫过坝顶流入一条长约 16km 的 3 级溪流,在广东翁源县新江镇上坝村附近汇入翁江的主要支流之一的横石水河。酸性矿山废水所经之处,河流的生态环境遭受严重破坏,大部分的沉水植物和挺水植物消失了,河床也已被一层厚厚的黄褐色或红褐色的废矿沉积物所覆盖。本文的研究地点设在上述两条溪流的汇合处附近(图 1, A 点)。

1.2 材料与采样方法

1.2.1 供试树叶 选择了当地 2 种常见树种漆树科(Anacardiaceae)的人面子(*Dracontomelon duperreanum*)和桃金娘科(Myrtaceae)的蒲桃(*Syzygium jambos*)的老熟新鲜树叶烘干后作为分解对象。

1.2.2 分解袋类型 选择了二种材料作为树叶分解袋,一种是底栖动物可自由出入,孔径为 5mm 的塑料网袋(30cm × 15cm),另一种是底栖动物不易进入,孔径为 0.1mm 的布袋(30cm × 15cm)。

1.2.3 取样方法 将上述 2 种树的老熟新鲜树叶洗净表面杂质后,放入恒温干燥箱在 50℃ 下烘干至恒重。然后每种树叶各称取 5g 干重分别封入网袋和布袋,每种树叶共称取 100 袋,其中网袋和布袋各占一半。本实验将树叶与分解袋组成 4 种组合,即人面子 × 网袋、人面子 × 布袋、蒲桃 × 网袋和蒲桃 × 布袋。每种组合以 25 袋为一组于 2004 年 12 月 9 日分别放置在受酸性矿山

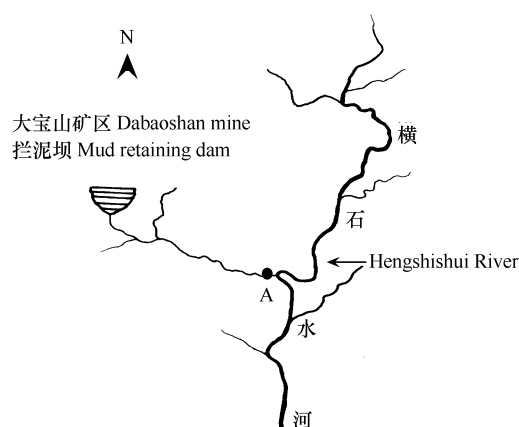


图 1 研究地点示意图

Fig. 1 Map showing study site

A 点表示采样点 A for AMD-impacted stream sampling site

废水影响的溪流(图 1, A 点),并用石块把分解袋压住,以免被水流冲走。分别在第 7d、21d、42d、77d 和 101d 后取样。每次取样随机取出每种组合各 5 袋(代表 5 次重复),分别封入塑料袋中带回实验室,先将树叶中的底

栖动物挑出并保存于 75 %酒精中,然后将树叶洗净,分别封入纸袋,置于恒温干燥箱 50 ℃ 烘干至恒重后称重。

1.2.4 研究地点水体理化参数测定 每次取样时,用便携式水质检测仪(YSF6600 型,美国金泉仪器公司产品)测定采样点 pH 值、温度、溶解氧、电导率和氨氮等理化指标,另外对研究地点水中多种重金属元素含量进行测定。所有用于重金属含量测定的水样均于当天带回实验室,并在 24h 内进行分析处理。用日立 Z-5300 原子吸收光谱仪进行含量测定^[16]。

1.3 数据处理与分析

树叶分解速率(k)用指数衰减模型^[17]进行拟合:

$$W_t = W_0 e^{-kt}$$

式中, t 是分解时间(d), W_t 是在时间 t 时树叶剩余的重量(g), W_0 是起始时树叶的重量(g), k 是树叶重量损失的分解速率常数,其单位为 d^{-1} 。采用 SAS(8.1 版本)进行统计分析与统计检验。

2 结果与分析

2.1 研究地点的水体理化特征

在整个研究期间,受酸性矿山废水污染的溪流 pH 值仅为 2.7~3.4(表 1),水体呈强酸性。与现行国家规定的地表水环境质量标准(GB3838-2002)相比,受酸性矿山废水污染的溪流 pH 值严重超标,重金属元素铜、锌、镉、铅的浓度也超过 V 类水标准的最高允许值。

2.2 酸性矿山废水对树叶分解速率的影响

在树叶放入水中的最初 7d 内,两种树叶的干重剩余率均迅速下降(图 2),其中下降幅度最大的是人面子树叶,干重损失率达 32.5 %。但同一种树叶在网袋和布袋内的树叶干重损失率几乎相同,差异不显著,说明这一阶段树叶的干重损失量主要是由淋溶作用引起的树叶中可溶性物质和无机矿物质的流失而造成的。7d 后,由于微生物和底栖动物的定殖活动,网袋和布袋中的树叶分解速率开始发生变化(图 2)。随着两种树叶的表面慢慢被黄褐色的氢氧化铁等沉积物所覆盖,树叶分解速度开始减缓。到了第 101 天,人面子树叶网袋和布袋中的树叶干重剩余率分别为 39.3 %和 47.9 %,而蒲桃树叶网袋和布袋中的干重

表 1 研究地点水体理化特征

Table 1 Selected water physicochemical parameters at AMD-impacted stream during field experiments

参数 Parameter	平均值 Mean (范围 Range)
pH	3.12 (2.72 ~ 3.42)
水温 Water temperature (℃)	16.3 (9.79 ~ 24.27)
溶解氧 DO (mg L ⁻¹)	10.36 (8.35 ~ 12.15)
电导率 Conductivity (μS cm ⁻¹)	10.04 (0.82 ~ 10.67)
盐度 Salinity (mg L ⁻¹)	2.23 (0.57 ~ 6.04)
氨氮 Ammonium (mg L ⁻¹)	0.36 (0.09 ~ 1.05)
镉 Cd (mg L ⁻¹)	0.02 (0.01 ~ 0.03)
铅 Pb (mg L ⁻¹)	0.38 (0.21 ~ 0.54)
锌 Zn (mg L ⁻¹)	3.84 (1.50 ~ 6.18)
铜 Cu (mg L ⁻¹)	2.10 (1.52 ~ 2.67)

剩余率仍保持较高的水平,分别为 61.3 %和 70.3 %。在整个 101d 的实验过程中,经方差分析,人面子树叶和蒲桃树叶之间的干重剩余率差异极显著($p < 0.001$),蒲桃树叶的分解速率明显低于人面子树叶。

利用指数衰减模型对树叶干重损失过程进行拟合,取得了很好的拟合效果(表 2)。人面子树叶在网袋和布袋中的树叶分解速率(k 值)分别为 $0.0088d^{-1}$ 和 $0.0070d^{-1}$,而蒲桃树叶在网袋和布袋中的树叶分解速率(k 值)分别为 $0.0041d^{-1}$ 和 $0.0027d^{-1}$ (表 2)。Petersen 等综合了各种水域中树叶分解的资料,提出用分解速率 k 值的大小将植物划分为 3 组^[18],即快组($k > 0.01d^{-1}$)、中等组(k 值介于 $0.005 \sim 0.01 d^{-1}$)和慢组($k < 0.005 d^{-1}$)。显然,根据人面子树叶和蒲桃树叶的分解速率 k 值,人面子树叶为中等组,而蒲桃树叶则属于慢组。在凋落物分解研究中,经常也用凋落物分解半衰期(即 50 %的凋落物被分解所需的时间)来衡量树叶分解的快慢^[8,11]。利用表 2 的回归方程可计算出每种树叶在网袋和布袋中的分解半衰期,人面子树叶在网袋和布袋中的分解半衰期分别为 57d 和 69d,而蒲桃树叶则分别为 144d 和 217d。

2.3 底栖动物在网袋中的定殖过程

在整个 101d 的实验过程中,从网袋中收集到定殖在 2 种树叶上的底栖动物只有 4 种,其中优势种为一种耐酸能力极强的集食性摇蚊(Chironomidae)幼虫,占个体总数的 99 %,其它种类包括 7 头蠓科(Ceratopogonidae)

幼虫,1头管水蚓(*Aulodrilus* sp.)和1头巴蛭(*Barbro-
nia* sp.)。可见被酸性矿山废水污染的溪流,大部分
底栖动物已无法生存,底栖动物的物种多样性大幅度
下降。

在树叶放入水中的最初 7d 内,只有摇蚊幼虫定
殖在两种树叶的网袋中,其中有 23 头摇蚊定殖在人
面子树叶上,94 头定殖在表面积相对较大的蒲桃树叶
上。随着时间的推移,定殖在二种树叶上的摇蚊幼虫
数量开始发生变化(图 3)。到了第 21 天,在蒲桃树叶
上定殖的摇蚊数量突然上升至 485 头,随后,摇蚊数
量随时间逐渐下降。而在整个实验过程中,定殖在人
面子树叶网袋中的摇蚊数量变化幅度不大(图 3)。

2.4 分解袋类型和摇蚊数量对树叶分解的影响

为了了解受酸性矿山废水污染的溪流中底栖动
物对树叶分解速率的影响。本实验设计了 2 种类型
的分解袋,一种是底栖动物可自由出入,孔径为 5mm
的塑料网袋,另一种为底栖动物不易进入,孔径为
0.1mm 的布袋。结果表明,同一种树叶在最初的 7d
内,由于淋溶作用,网袋和布袋内的树叶干重损失率
基本一致(图 2)。在随后的各个阶段,网袋和布袋中
的树叶分解速率开始发生变化。从图 2 可以看出,总
的变化趋势是布袋中树叶的分解速率比网袋稍慢。
在本实验的 7~77d 之间,摇蚊幼虫定殖在人面子树
叶网袋中的数量从第 7 天的 23 头,上升到第 42 天的
123 头,然后又下降到第 77 天的 41 头(图 3)。经 t -
检验人面子树叶网袋和布袋之间的干重剩余率差异并
不显著($p > 0.05$)。摇蚊幼虫定殖在蒲桃树叶网袋中
的数量从第 7 天的 94 头,上升到第 21 天的 485 头,然
后下降到第 42 天的 162 头及第 77 天的 85 头(图 3),
经 t -检验在 7~42d 之间蒲桃树叶网袋和布袋之间的
干重剩余率差异也不显著($p > 0.05$)。由此可见,摇
蚊种群在网袋中的数量波动对 2 种树叶分解速率的
影响并不显著。

3 讨论

树叶分解是一个复杂的生态过程,其分解速率不仅与树叶种类、河溪中微生物和底栖动物的活动等生物
因素有关,而且还受河溪水温、流速、底质类型及水化学特征等非生物因素的影响^[8,11,19~22]。树叶所含的化学
成分也会影响树叶分解速率,一般来说,木质素或单宁含量高的凋落物分解较慢,而营养成分丰富的树叶则分
解较快^[23~25]。本研究发现,蒲桃树叶的分解速度显著慢于人面子树叶。据报道蒲桃树叶含有丰富的单宁类
成分^[26,27]。其中的缩合单宁是羟基黄烷类化合物以 C—C 键相联缩合而成,不易被水解。缩合单宁在水中久
置能进一步缩合成分子量更大、难溶于水的暗红色沉淀—鞣红,而且在酸性条件下,鞣红的形成更为迅
速^[28,29]。这可能就是蒲桃树叶在酸性矿山废水影响下分解缓慢的原因之一。根据各种水域(溪流、湖泊和湿

表 2 两种树叶的分解速率及指数衰减模型

Table 2 The exponential models and decomposition rates of two species
of leaves

树叶种类/分解袋类型 Species/litter bag type	指数衰减模型 Exponential model	R^2	p 值
人面子 <i>D. duperreanum</i>			
网袋 Coarse-mesh bag	$Y = 4.1151e^{-0.0088t}$	0.7249	<0.001
布袋 Fine-mesh bag	$Y = 4.0508e^{-0.0070t}$	0.6267	<0.001
蒲桃 <i>S. jambos</i>			
网袋 Coarse-mesh bag	$Y = 4.5099e^{-0.0041t}$	0.7967	<0.001
布袋 Fine-mesh bag	$Y = 4.4935e^{-0.0027t}$	0.6211	<0.001

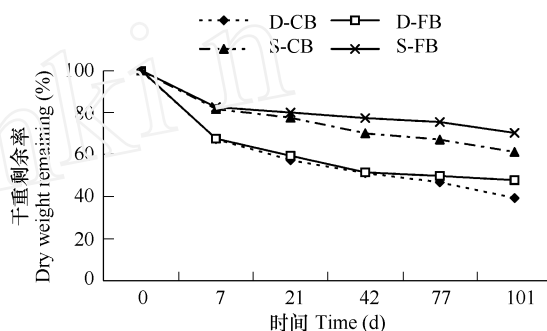


图 2 研究期间两种树叶的干重剩余率的变化

Fig. 2 The changes in dry weight remaining (%) of two species of leaves
during the experiment

D-CB:人面子 ×网袋组合 Coarse-mesh bag of *D. duperreanum*; D-FB:人
面子 ×布袋组合 Fine-mesh bag of *D. duperreanum*; S-CB:蒲桃 ×网袋
组合 Coarse-mesh bag of *S. jambos*; S-FB:蒲桃 ×布袋组合 Fine-mesh
bag of *S. jambos*; 所有数据均为 5 次重复的平均值

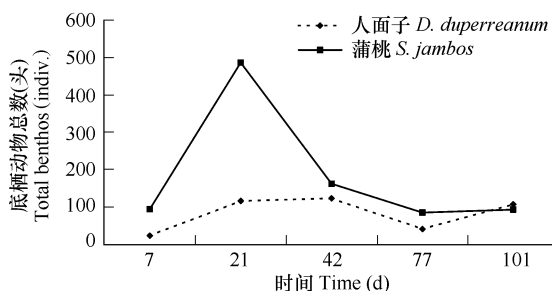


图 3 摇蚊在 2 种树叶网袋中定殖的个体总数

Fig. 3 The total *Chironomidae* larvae individuals colonizing coarse-mesh
leaf litter bags on two species of leaves

地等)的研究资料显示^[11],微生物在凋落物分解中起着重要作用,特别是在分解过程的前期,由于微生物的定殖和生长繁殖活动使凋落物内部结构发生改变而使降解过程易于进行。低 pH 的水体对树叶分解有显著的影响,但这种影响不是直接的,而是因为酸性水体抑制了微生物的活动以及降低了底栖无脊椎动物群落的密度和丰富度,从而间接地影响了树叶分解速率^[30~32]。在本研究中,除了 pH 值严重超标外,水体中主要重金属元素铜、锌、镉、铅的含量也超过 V 类水标准的最高允许值。重金属毒性不仅能大大降低微生物群落结构的生物量及其多样性,而且会严重地抑制微生物的生物活性及代谢^[33~36]。另外,酸性矿山废水中的金属氧化物也会影响树叶的分解速率,例如 Gray 等在一项对比试验中发现,即使改善了水质,降低了重金属的浓度,但由于金属氧化物的不断沉淀,树叶分解速率仍然缓慢^[37]。Niyogi 等也证实树叶分解速率快慢与金属氧化物沉淀率的大小有直接的关系^[4]。本研究结果也表明,受酸性矿山废水的影响,底栖动物群落的多样性大为减少,只剩下耐酸能力极强的摇蚊等几种底栖动物,由于金属氧化物的沉积物在树叶表面的不断沉淀,使树叶处于缺氧状态,抑制了微生物的活动,与此同时,重金属的毒性使微生物群落的生物量及代谢活性降低,导致树叶分解速率缓慢。

底栖动物对水体 pH 值变化的响应各异,有些类群对水体 pH 值的变化反应很敏感,例如当水体 pH 值低于 6.5 时,大多数的蜉蝣种类将消失,而大多数底栖动物对水体 pH 的忍耐程度一般在 pH 值 4.5 以上^[38]。在本研究中,由于受酸性矿山废水的长期污染,溪流水体的 pH 值已降到 2.7~3.4 之间,但仍能收集到 4 种底栖动物,其中摇蚊在数量上占绝对优势。这类摇蚊可能属于嗜酸性(acidophily)种类^[39]。从取食方式来看,这类摇蚊幼虫属于集食者。与撕食者或刮食者不同,集食者取食时不会对树叶造成机械破碎。它们只是把树叶作为定殖的栖境,依附在树叶上取食沉积在上面的细颗粒有机物(FPOM),而不是把树叶作为直接的食物源。因此在本研究中,摇蚊在树叶上的取食活动以及数量波动,并没有对树叶分解速率造成显著影响。这点与大多数的研究结果是一致的^[8,11,19,40]。关于低 pH 值水体是否对摇蚊物种多样性有影响,目前仍有争议,Lindegaard 总结了温带地区的一些相关研究,认为水体酸化会降低摇蚊的物种多样性,但剩下的少数耐酸种类通常个体数很丰富^[41]。与此相反,Cranston 等根据澳大利亚北部热带地区的研究结果认为低 pH 值的溪流中具有更高的摇蚊物种丰富度^[39]。从本研究采集到的摇蚊幼虫外部形态来看,基本上属于同一个种,这点与温带地区的研究结果相似。但仅依靠摇蚊幼虫来鉴定种类目前还存在困难,因此,酸性矿山废水对华南地区摇蚊种类丰富度的影响还有待进一步研究。

References:

- [1] Lin C X, Long X X, Tong X L, *et al.* Guangdong Dabaoshan Mine: ecological degradation, acid drainage and possible measures for their Remediation. *Ecology Science*, 2003, 22(3): 205~208.
- [2] Wu Y G, Lin C X, Tong X L, *et al.* Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine. Downstream aquatic ecosystem. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 165~168.
- [3] Zhou Q X. Pollution ecological problems of old industrial and mining areas and future research prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16: 1146~1150.
- [4] Niyogi D K, Lewis W M, McKnight D M. Litter breakdown in mountain streams affected by mine drainage: biotic mediation of abiotic controls. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 506~516.
- [5] Minshall G W. Role of allochthonous detritus in the trophic structure of a woodland spring brook community. *Ecology*, 1967, 48: 139~149.
- [6] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1980, 37: 130~137.
- [7] Wallace J B, Eggert S L, Meyer J L, *et al.* Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs. *Science*, 1997, 277: 102~104.
- [8] Allan J D. *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. London: Chapman & Hall, 1995. 109~129.
- [9] Pascoal C, Cásio F, Gomes P. Leaf breakdown rates: a measure of water quality? *International Review of Hydrobiology*, 2001, 86: 407~416.
- [10] Petersen R C, Cummins K W, Ward G M. Microbial and animal processing of detritus in a woodland stream. *Ecological Monographs*, 1989, 59: 21~39.
- [11] Webster J R, Benfield E F. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1986, 17: 567~594.
- [12] Mackay R J, Kersey K E. A preliminary study of aquatic insect communities and leaf decomposition in acid streams near Dorset. *Ontario. Hydrobiologia*, 1985, 122: 3~11.
- [13] McKnight D M, Feder G L. The ecological effect of acid conditions and precipitation of hydrous metal oxides in a Rocky Mountain stream. *Hydrobiologia*, 1984, 119: 129~138.

- [14] Mulholland P J, Palumbo A V, Elwood J W, *et al.* Effects of acidification on leaf decomposition in streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 1987, 6: 147 ~ 158.
- [15] Thompos P L, B  locher F. Effects of pH on leaf breakdown in streams and in the laboratory. *J. North. Am. Benthol. Soc.*, 1989, 8(3): 202 ~ 210
- [16] State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analytical method of water and wastewater. 3rd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1998. 78 ~ 353.
- [17] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44: 322 ~ 332.
- [18] Petersen R C, Cummins K W. Leaf processing in a woodland stream. *Freshwater Biology*, 1974, 4: 343 ~ 368.
- [19] Anderson N H, Sedell J R. Detritus processing by macroinvertebrates in stream ecosystems. *Ann. Rev. Entomol.*, 1979, 24: 351 ~ 377.
- [20] Cummins K W, Klug M J. Feeding ecology of stream invertebrates. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1979, 10: 147 ~ 172.
- [21] Jiang M X, Deng H B, Tang T, *et al.* Comparison of leaf decomposing rate in a headwater stream in Xiangxi River catchment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 27 ~ 30.
- [22] Gra  a, M A S. The role of invertebrates on leaf litter decomposition in streams—a review. *International Review of Hydrobiology*, 2001, 86:383 ~ 393.
- [23] Boon J J, Wetzel R G, G  dshalk G L. Pyrolysis mass spectrometry of some *Scirpus* species and their decomposition produces. *Limnol. Oceanogr.*, 1982, 27: 839 ~ 848.
- [24] Cameron G N, LaPoint T W. Effects of tannins on the decomposition of Chinese tallow leaves by terrestrial and aquatic invertebrates. *Oecologia*, 1978, 32: 349 ~ 366.
- [25] Valiela I, K  umjian L, Swain T, *et al.* Cinnamic acid inhibition of detritus feeders. *Nature*, 1979, 280: 5 ~ 57.
- [26] Djipa C D, Delm   M, Quetin-Leclercq J. Antimicrobial activity of bark extracts of *Syzygium jambos* (L.) Alston (Myrtaceae). *Journal of Ethnopharmacology*, 2000, 71: 307 ~ 313.
- [27] Tan M L, Zhou L G, Wang Y, *et al.* Advances on antimicrobial constituents from Myrtaceous plants. *J. Northwest Sci. Tech. Univ. Agri. & Fore. (Nat. Sci. Ed.)*, 2005, 33 (Suppl.): 225 ~ 229.
- [28] Song L J, Di Y, Shi B. The significance and development trend in research of plant polyphenols. *Progress in Chemistry*, 2000, 12(2): 161 ~ 170.
- [29] Tan R X. Plant composition analysis. Beijing: Science Press, 2002. 514 ~ 523.
- [30] Hall R J, Likens G E, Fiance S B, *et al.* Experimental acidification of a stream in the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Ecology*, 1980, 61: 976 ~ 989.
- [31] Otto C, Svensson B S. Properties of acid brown water streams in South Sweden. *Arch. Hydrobiol.*, 1983, 99: 15 ~ 36.
- [32] Siefert J, Mutz M. Processing of leaf litter in acid waters of the posting-mining landscape in Lusatia, Germany. *Ecological Engineering*, 2001, 17: 297 ~ 306.
- [33] Cotrufo M F, De Santo A V, Alfani A, *et al.* Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in *Quercus ilex* L. Woods. *Environmental Pollution*, 1995, 89:81 ~ 87.
- [34] Fliebbach A, Martens R. Soil microbial biomass and activity in soil treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biology* 1994, 26: 1201 ~ 1205
- [35] Suhadlc M, Schroll R, G  ttinger A, *et al.* Effects of modified Pb²⁺, Zn²⁺, and Cd²⁺ availability on the microbial communities and on the degradation of isoproturon in a heavy metal contaminated soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 1943 ~ 1954.
- [36] Yao H Y, Xu J M, Huang C Y. Substrate utilization pattern, biomass and activity of microbial communities in a sequence of heavy metal-polluted paddy soils. *Geoderma*, 2003, 115:139 ~ 148.
- [37] Gray L J, Ward J V. Leaf litter breakdown in streams receiving treated and untreated metal mine drainage. *Environment International*, 1983, 9:135 ~ 138.
- [38] Dodds W K. *Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications*. San Diego: Academic Press. 2002. 276 ~ 284.
- [39] Cranston P S, Cooper P D, Hardwick R A, *et al.* Tropical acid streams — the chironomid (Diptera) response in northern Australia. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 473 ~ 483.
- [40] Pope R J, Gordon A M, Kaushik N K. Leaf litter colonization by invertebrates in the littoral zone of a small oligotrophic lake. *Hydrobiologia*, 1999, 392: 99 ~ 112.
- [41] Lindegaard K. Classification of water-bodies and pollution, In: Armitage, P D *et al.* eds. *Chironomidae: Biology and Ecology of Non-biting Midges*. London: Chapman & Hall, 1995. 385 ~ 404.

参考文献:

- [1] 林初夏,龙新宪,童晓立,等. 广东大宝山矿区生态环境退化现状及治理途径探讨. *生态科学*, 2003, 22(3): 205 ~ 208.
- [2] 吴永贵,林初夏,童晓立,等. 大宝山矿水外排的环境影响. 下游水生生态系统. *生态环境*, 2005, 14(2): 165 ~ 168.
- [3] 周启星. 老工矿区污染生态问题与今后研究展望. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1146 ~ 1150.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 第3版. 北京:中国环境科学出版社, 1998. 78 ~ 353.
- [21] 江明喜,邓红兵,唐涛,蔡庆华. 香溪河流域河流中树叶分解速率的比较研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 27 ~ 30.
- [27] 谈满良,周立刚,汪治,等. 桃金娘科植物抗菌成分的研究进展. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(增刊): 225 ~ 229.
- [28] 宋立江,狄莹,石碧. 植物多酚研究与利用的意义及发展趋势. *化学进展*, 2000, 12(2): 161 ~ 170.
- [29] 谭仁祥主编. 植物成分分析. 北京:科学出版社, 2002. 514 ~ 523.