

太行山低山区枯落物分解及主要营养元素变化

璩芳^{1,2}, 张万军¹, 刘秀萍¹

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 应用分解袋法研究了太行山低山区枯落物的分解及主要营养元素的动态变化。结果表明,不同植被类型的枯落物分解损失率差异明显,表现为:刺槐林>薄皮木灌草>荆条灌草>草丛;损失率变化趋势与温度和降雨量变化一致。分解过程中,K,Mn,N 元素发生净释放;Na 元素有净积累;Ca 元素先释放后积累;Zn,P 与 Ca 恰好相反,元素先积累后释放。分解 1 a 后,枯落物各元素总体释放率的大小顺序为:K>N>Mg>P>Mn>Zn>Na>Ca。太行山各种植被枯落物分解 1 a 来元素归还量都以 K 量最高,Ca 量为负值,各元素总归还量大小依次为:K>P>Mg>Mn>N>Zn>Na>Ca。太行山 22 a 土壤养分变化,与枯落物归还量大体吻合。

关键词: 枯落物分解;失重;元素含量;太行山低山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0041-05

中图分类号: S714.8, X171

Decomposition of Litter and Its Nutrient Dynamics in Taihang Mountains

QU Fang^{1,2}, ZHANG Wan-jun¹, LIU Xiu-ping¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS,

Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Decomposition of litter and the dynamics of the major elements in litter in Taihang Mountainous area were studied by using litterbag method. Results showed that mass losses of different vegetation types were different, which was in the order of *Robinia pseudoacacia*>*Punica granatum* L>*Leptodermis oblonga* shrub bushes>*Vitex negundo* shrub bushes>grass. The changes of mass losses during decomposition were consistent with temperature and rainfall. During decomposition, there were significant net releases of K, Mn, and N, while a significant net accumulation of Na. Ca was firstly accumulated and then released, while Zn and P were firstly released and then accumulated. By the release rate of the elements from litter after 12 months of decomposition, the elements were in the order of K>N>Mg>P>Mn>Zn>Na>Ca. K had the maximum amount of nutrient returned in the process of litter decomposition, while the amount of Ca was negative. By the amount of nutrient returned, the elements were in the order of K>P>Mg>Mn>N>Zn>Na>Ca. According to soil nutrient analysis, the change of each element content in soil accorded with the nutrient returned of litter.

Keywords: litter; decomposition; mass loss; element content; Taihang Mountains

枯落物的分解是生态系统生物地球化学循环的一个重要组成部分,分解速率对生态系统生产力有着重要影响^[1]。目前国内外的研究多以森林生态系统^[1-3]及湿地生态系统^[4-5]为对象,研究内容包括枯落物分解过程和养分动态^[2,4]、影响枯落物分解的气候因素和环境条件^[5]等,其中的主导作用因植物种类和环境条件而异^[6]。太行山低山区为阔叶林破坏后发育的次生旱生草灌丛以及人工栽培林,不同的植物类型

有着不同营养分配模式及其适应的生境类型,也决定了其有别于其它生态系统的分解释放模式。本文通过研究太行山区枯落物分解规律,为保持太行山土地资源的可持续利用,提高植被生产力提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省太行山中部的低山丘陵区,河

收稿日期:2010-04-21

修回日期:2010-05-31

资助项目:河北省科技攻关计划“太行山生态稳定机制与生态服务功能研究”(07237106D)

作者简介:璩芳(1986—),女(汉族),山东省章丘市人,硕士研究生,主要从事生态工程方面的研究。E-mail: qf-0920@163.com。

通信作者:张万军(1955—),男(汉族),河北省南宫市人,研究员,博士生导师,主要从事山地生态水文生态工程研究。E-mail: zhangwj@sjziam.ac.cn。

北省石家庄市元氏县,该区为中国科学院太行山山地生态试验站(37°52'44"N,114°15'50"E)的重点研究区域,海拔 247~1 040 m。试区属半干旱半湿润大陆性季风性气候,冬季干旱少雨,夏季炎热多雨,年平均气温 13.2 °C,最高温度 42 °C,最低温度 -25.3 °C,日照时数 2 600~2 800 h,多年平均降水量 570~620 mm。降水分布不均,其中雨季(7—9 月)降水占全年降水量的 67.8%。春季降水仅占 7.69%。成土母质以片麻岩为主,并有一定数量的页岩和石灰岩,土壤贫瘠。该区植被属北暖温带阔叶林亚带,阔叶林破坏后发育的次生旱生草灌丛,以及人工栽培植被,以荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、酸枣(*Ziziphus jujube* var. *spinosa*)、黄背草(*Themeda triandra* var. *japonica*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为主。在阳坡的主要灌草植被为荆条和酸枣,阴坡的主要灌草植被为薄皮木(*Leptodermis oblonga*)等。

1.2 试验方法

样地的基本情况见表 1。枯落物分解采用分解袋法。分解袋由孔径 0.5 mm 的尼龙网制成,规格为 20 cm × 25 cm。搜集枯落物,带回实验室剪成 10 cm 左右的小段,装进分解袋,每袋装 50 g (烘干重)。2008 年 10 月底将分解袋随机投放到各个样地内,并于投放后的 1 a 内隔月取回 3 袋,带回实验室拣出植物根系及泥土颗粒,烘干至恒重。称重后样品磨碎,过筛,用于样品中元素含量的测定。

1.3 分析方法与数据处理

1.3.1 样品测试 枯落物样品分别经 H₂SO₄ 和 H₂O₂ 消解后测定全 N 和全 P 含量。K, Na, Ca, Mg, Mn, Zn 和 Fe 含量用高温电炉灰化后在火焰原子吸收分光光度计上测定^[7]。

1.3.2 数据统计分析 利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 枯落物分解速率及影响因素

2.1.1 枯落物分解速率 枯落物在分解过程中,其质量会发生变化,这种变化通常用枯落物失重率来表示。不同植被枯落物因其组分不同,所含难分解的有机成分(木质素、纤维素等)的组合情况有所差异,使得枯落物失重率的变化形式各异。2008 年 11 月,将枯落物放回原处进行自然分解。通过 1 a 的时间,其失重率变化范围在 21.8%~32.8%,其中以刺槐的分解速率最快,累积失重率达到 32.8%,草丛分解速率最慢,累积失重率为 21.8%。4 种落叶分解快慢的

顺序为:刺槐林>薄皮木灌草>荆条灌草>草丛。且在开始分解后的前 6 月枯落物失重率变化较平缓,在后来 6 月,枯落物失重变化较快(图 1)。

表 1 样地基本情况

位置	样地编号	海拔/m	地貌位置	总覆盖度/%	优势植被	群落类型
谭峪沟	T ₁₁	510	山坡上部	95	薄皮木	灌草丛
	T ₁₂	480	坡中	100	荆条	
	T ₁₃	469	坡底	100	荆条	
	T ₂₁	500	坡顶	100	荆条	
	T ₂₂	486	坡中	98	荆条	
	T ₂₃	459	坡下	90	酸枣	
	L ₄₁	568	山脊	95	荆条	
李曹沟	L ₄₂	552	上部	95	荆条	灌草丛
	L ₄₄	530	下部	90	荆条	
	L ₄₅	563	坡上	100	荆条	
	L ₄₆	532	坡中部	100	薄皮木	
	L ₄₇	499	坡下	100	薄皮木	
	Tc ₁	469	坡上部	95	荆条	
	Tc ₂	434	坡下	85	荆条	
支沟	Tc ₃	442	坡下部	100	薄皮木	灌草丛
	Tc ₄	484	坡上	100	薄皮木	
	C ₂₂	453	坡下部	100	薄皮木	
	C ₄₂	485	坡上部	100	薄皮木	
曹家沟	C ₁₂₁	474	坡上	90	荆条	灌草丛
	C ₁₄₁	420	坡下	100	荆条	
	Z ₂₄	666	顶部	100	白莲蒿	
Z ₂₅	650	坡上部	100	白莲蒿		
Z ₂₆	625	坡中	100	白羊草		
Z ₂₇	598	坡下部	100	白莲蒿		
小泉水沟	Q ₁₁	370	沟掌中部	90	刺槐	刺槐林
	Q ₂₁	413	坡上部	95	刺槐	
	Q ₃₁	398	坡中上部	90	刺槐	
	Q ₄₁	397	坡中上部	90	刺槐	

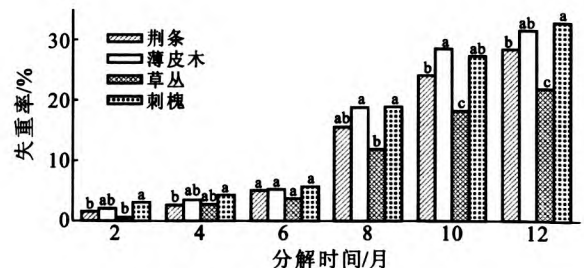


图 1 不同植被枯落物失重率变化

2.1.2 气候因素对枯落物分解的影响 枯落物分解与土壤温度和气温之间的关系非常密切。温度较高时,其枯落物分解失重率较大。在枯落物分解初期(0~6 月内)处于冬季,分解较慢,累积损失仅占一年累积分解失重的 18.6%。分解高峰期出现在随后的 6~12 月,累计损失占总损失量的 81.4%。另外枯落

物分解与降雨量也呈现类似关系,枯落物分解与温度和降雨都达到了显著相关(图 2,表 2)。制约枯落物分解的生物因素是指参与枯落物分解的土壤微生物和土壤动物群落的种类、数量和活性等。土壤温度上升水分增加有助于土壤动物的繁殖、增加动物的活性。同理也有助于微生物数量的增加,微生物活性增强,加速枯落物分解。

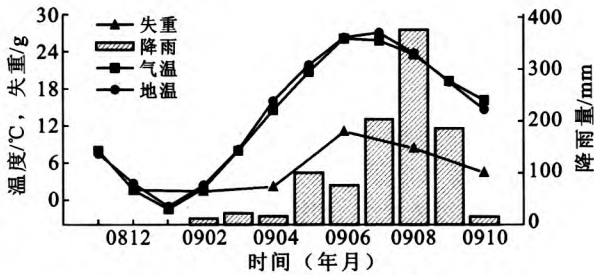


图 2 植被枯落物失重率随温度和降雨的变化

表 2 枯落物失重与温度和降雨的相关关系

相关	气温	地温	降雨	失重
气温	1			
地温	0.998**	1		
降雨	0.792**	0.795**	1	
失重	0.843**	0.851**	0.625**	1

注: ** 表示显著相关。

2.1.3 坡向坡位对枯落物分解的影响 枯落物失重率表现为:阴坡>半阴半阳坡>阳坡(表 3),根据 1987 年对阴坡阳坡气象观测值,阳坡辐射量比阴坡高 167 kJ/(cm·a),日照时数多 325 h,蒸发多,造成土壤水分含量少,土壤含水量影响的微生物的活动,限制了枯落物分解速率。但是由于观测结果阳坡平均地面温度比阴坡高 4℃,高温也利于微生物等的活动,但总体结果失重率阴坡>阳坡,但没有达到显著差异。

枯落物失重率 2 月和 4 月为:坡下>坡中>坡上,其余为:坡下>坡上>坡中(表 4),一般坡下水分含量比坡上大,说明水分还是枯落物分解的限制因素。王勤^[1]在调查中也发现两块样地虽然林龄相同,但立地条件的差异较大,从而导致两林分在生长量、生产力上存在一定差异,进而造成两林分在凋落物产量及其养分归还量上存在明显差异。因此,立地条件影响着枯落物产量及其相应的养分分解。

表 3 不同坡向对枯落物分解失重率的影响 %

坡向	12 月	2 月	4 月	6 月	8 月	10 月
阳坡	1.34	2.47	4.38	15.7	24.4	28.3
半阳半阴坡	1.65	2.64	4.89	17.4	26.1	30.3
阴坡	2.42	3.79	6.07	17.3	26.1	30.6

表 4 不同坡位对枯落物分解失重率的影响 %

坡位	12 月	2 月	4 月	6 月	8 月	10 月
坡上	1.34	2.33	3.95	16.0	24.6	29.4
坡中	0.75	2.76	4.68	15.1	22.8	26.1
坡下	2.40	3.58	5.96	16.8	24.8	29.2

2.2 枯落物分解营养元素变化规律

枯落物在矿化过程中释放的营养元素通过淋溶作用进入土壤,参与生态系统的养分循环。枯落物分解过程中元素的积累或释放可用积累系数(NAI)表示^[4]:

$$NAI = M_t \cdot X_t / (M_0 \cdot X_0) \times 100\%$$

式中: M_t ——枯落物在 t 时刻的干物质重量; X_t ——时刻枯落物中元素的浓度(g/kg); M_0 ——枯落物的初始干物质重量; X_0 ——枯落物中元素的初始浓度(g/kg)。NAI<100%,说明枯落物分解过程中元素发生了净释放,NAI>100%,说明枯落物分解过程中元素发生了净积累。

2.2.1 元素释放 K, Mn, N 这 3 种元素在枯落物分解过程中,其 NAI<100%($P<0.05$),元素发生了净释放。

K 在分解前 181 d 薄皮木和草丛发生阶段性积累,181 d 后各种植被释放趋势明显,总体表现为净释放。到试验结束,荆条灌丛、薄皮木灌丛、草丛、刺槐 K 总量分别减少到初始量的 33%,36%,49%,42%。可能 K 在植物组织中既不是有机物质的组分,也不是植物代谢过程的中间产物,而是呈离子状态存在,在分解过程中极易移动^[8]。因此,分解过程中淋溶作用占主导。Mn 元素在分解过程中一直处于净释放状态。Mn 元素在分解期间的释放可能与淋溶作用有关。N 元素除在分解的前 120 d 薄皮木发生阶段性积累,其余一直处于释放状态,分解 1 a 后,荆条灌丛、薄皮木灌丛、草丛、刺槐 N 总量分别减少到初始量的 70%,76%,46%,70%。这跟植物本身 C/N 比及 N 源供给有关。N 也是分解微生物群落生长发育的限制性养分^[9],草丛和薄皮木中初始 N 含量较低,不能达到微生物可利用 N 的需求,另外 N 的释放可能由于植物组织中可溶性蛋白质的淋溶损失^[10]。

2.2.2 元素积累 Na 元素在枯落物分解过程中,其 NAI>100%($P<0.05$),元素发生了净积累。由表 5 可以看出,试验期间枯落物中 Na 发生了净积累。Na 的 NAI 值呈现波动性变化先增加后减少,最高峰分别达到 593%,428%,937%,437%。Na 是在植物体内极易转移被再利用的元素,它们在落叶前转移到植物体的其它部分,造成凋落物中的低浓度,在分解期间发生明显的积累过程。

2.2.3 既释放又积累 Ca 前期的 NAI 值 < 100% ($P < 0.05$), 后期的 NAI 值 > 100% ($P < 0.05$), 元素先释放后积累; Zn, P 恰好与 Ca 相反, 元素先积累后释放; Mg 前段既积累又释放最后都转为释放。Ca 在前 242 d 内一直处于释放状态, 分解最后 4 月发生积累。而有关学者研究认为, Ca 的释放主要受微生物作用控制, 而淋溶所起的作用较小^[11]。Ca 浓度和绝对量的下降说明枯落物初始 C/Ca 低于最小 C/Ca 比值, 而非有机态营养元素的释放是在碳与营养元素比, 低于其最小比值才发生的^[1]。

Zn, P 在前 242 d 一直处于积累状态, 之后随着时间变化逐渐转为释放。Zn 元素的 NAI 值总体为先减小后增加再减小在森林中的研究表明, Zn 在枯落物中的积累, 这可能是由于在分解过程中有些腐殖质成分能够强烈结合多价的 Zn 离子和 Fe 离子, 形成稳定性很强的金属—有机复合物^[12]。另外也可能作为难分解的有机物的组分, 微生物很难利用, 所以也要先进行富集。

从 P 浓度来看, 4 种枯落物中 P 元素浓度一直处于波动增加的状态。在 242 d 时都达到了最大值。P 的积累系数薄皮木枯落物变化较剧烈, 先减小后增加, 其余均为先增加后减小, 但是总体上一直处于释放状态。武海涛^[13]研究也发现三江平原 3 种枯落物分解过程中 P 都发生了净释放。

整个试验期间, Mg 的 NAI 值缓慢下降, 前一阶段薄皮木草丛表现为积累, 其余植被表现为释放, 最后都转为释放, 总体表现为既释放又积累。Mg 的 NAI 在草丛中变化较剧烈可能也与其初始浓度较低有关^[1]。

总之, N 和 Mg 的分解, 浓度总体先升高后下降的。对于初始浓度足够高, 可满足微生物分解活动要求的元素, 则没有这一过程, 如 K。还有一些元素, 富集缓慢, 或初始浓度较低从而需要富集的量很大, 没有明显的分解迹象, 如 Na。另外分解也受微生物的活动的影响, 如果是难分解的有机物的组分, 微生物很难利用, 也要先进行富集, 如 Zn, P, Mg; 但是 Ca 例外, 其在分解期间的积累, 还需进一步了解。

表 5 不同枯落物分解 1 a 来元素积累系数 (NAI) 变化

累积系数	全解时间/d						累积系数	全解时间/d						
	61	120	181	242	304	365		61	120	181	242	304	365	
K	荆条	0.96	0.93	0.70	0.53	0.32	0.33	荆条	3.72	3.85	5.94	3.58	1.67	1.43
	薄皮木	1.30	0.99	1.36	0.66	0.36	0.36	薄皮木	1.38	2.69	4.28	1.21	1.08	0.84
	草丛	1.20	0.97	1.15	0.88	0.47	0.49	草丛	8.47	9.37	7.08	4.86	4.08	1.19
	刺槐	0.97	1.02	0.82	0.51	0.38	0.42	刺槐	2.80	3.11	4.37	2.71	1.32	1.41
Mg	荆条	0.89	0.87	0.89	0.79	1.01	0.67	荆条	0.51	0.51	0.56	0.48	0.73	0.70
	薄皮木	1.51	1.44	1.34	1.18	1.16	0.87	薄皮木	0.59	0.66	0.80	0.94	0.90	0.99
	草丛	0.95	1.98	1.54	1.52	0.88	0.70	草丛	0.09	0.31	0.13	0.10	0.16	0.17
	刺槐	0.79	0.88	0.82	0.71	0.93	0.60	刺槐	0.59	0.55	0.65	0.65	0.42	0.47
Zn	荆条	1.25	1.31	1.31	1.31	0.74	0.55	荆条	0.93	0.81	0.99	0.93	0.88	0.70
	薄皮木	1.02	1.31	1.08	1.21	0.66	0.50	薄皮木	1.22	1.14	0.83	0.97	0.98	0.76
	草丛	0.94	1.91	0.97	2.76	0.65	0.63	草丛	0.91	0.96	0.85	0.60	0.80	0.46
	刺槐	1.39	1.39	1.25	1.53	0.80	0.94	刺槐	0.62	0.96	0.94	0.64	0.85	0.70
Ca	荆条	0.71	0.92	0.60	0.71	2.24	1.59	荆条	2.14	2.59	2.33	2.36	1.12	0.84
	薄皮木	0.91	0.76	0.70	0.76	2.18	1.61	薄皮木	2.46	2.29	1.89	2.55	1.01	0.87
	草丛	0.65	1.32	0.54	0.38	1.72	1.62	草丛	2.22	0.76	2.56	1.89	0.33	0.30
	刺槐	0.57	0.85	0.80	0.97	1.85	1.77	刺槐	2.42	2.41	2.82	1.58	0.63	0.98

2.3 枯落物养分归还及其与植被土壤养分变化关系

在生物小循环中, 植被枯落物起着至关重要的作用, 被认为是向森林归还养分的最重要途径之一^[14]。植物结构从简单到复杂, 生物量也逐渐加大, 枯落物积累量呈明显的上升趋势; 枯落物在分解过程中, 营养物质不断地释放归还到土壤中^[15], 被植物再利用。枯落物归还的养分多少与枯落物量及枯落物中养分含量有密切关系。太行山枯落物分解 1 a 后各组分元

素归还量都以 K 浓度最高, Ca 归还量为负值, 枯落物中的微生物可能从土壤中固定了 Ca^[16]。各元素总归还量大小依次为: $K > P > Mg > Mn > N > Zn > Na > Ca$, 在刘秀萍做的太行山 22 a (1986—2008 年) 土壤养分变化研究中, 表明 K, Na, Mg, Fe, Zn 和烧失量显著增加, Ca 元素含量显著下降, 有机质, N, P, Mn 变化不显著, 与枯落物归还量大体吻合, 但不完全一致。但土壤中的活性 P 随植被演替变化比较复杂。

一般认为在演替初期植物可获得的P在短期内是增加的。但很快因植物的固定和转化而降低^[17],本研究结果显示P量增加没有达到显著。氮素既能通过固氮微生物固定空气中的氮气也会被微生物分解成

为NO₂和N₂等挥发损失,N分解后归还土壤的量比较难以确定,再加上植物利用N的量比较多,变化不明显。其余元素如K,Mn,Mg等基本上归还给了土壤^[18],随着时间的变化,其含量逐渐增加(表6)。

表6 不同枯落物1a来各种元素损失量情况

植被	K	Mg	Zn	Ca	Na	Mn	N	P
荆条灌草丛	122.79	2.39	2.00	-128.05	-1.27	11.09	2.71	40.35
薄皮木灌草丛	101.17	19.87	2.03	-149.18	2.27	16.20	2.17	25.15
草丛	53.85	40.10	1.17	-55.38	-0.70	20.03	3.00	39.93
刺槐林	74.31	53.39	0.11	-165.32	-0.07	7.48	4.43	28.57

3 结论

(1) 不同植被类型的枯落物分解损失率差异明显,表现为:刺槐林>薄皮木灌草>荆条灌草>草丛。损失率变化与温度与降雨量变化方向一致,11月至次年4月分解较慢,5月起快速分解。

(2) 根据枯落物分解过程中NAI的变化趋势,元素含量变化情况可分为3类,即释放、积累、既释放又积累。K,Mn,N元素发生了净释放;Na元素发生了净积累;Ca元素先释放后积累;Zn,P恰好与Ca相反,元素先积累后释放。分解1a后,枯落物各元素总体释放率的大小顺序为:K>N>Mg>P>Mn>Zn>Na>Ca。

(3) 太行山枯落物分解1a后各组分元素归还量都以K归还量最高,Ca归还量为负值,枯落物中的微生物可能从土壤中固定了Ca,各元素总归还量大小依次为:K>P>Mg>Mn>N>Zn>Na>Ca。太行山22a来土壤养分变化,与枯落物归还量大体吻合。

[参 考 文 献]

- [1] 王璩,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.
- [2] 黄建辉,陈灵芝,韩兴国. 辽东栎枝条分解过程中几种主要营养元素的变化[J]. 植物生态学报, 1998, 22(5): 398-402.
- [3] 杨玉盛,陈光水,郭剑芬,等. 杉木观光木混交林凋落物分解及养分释放的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 275-282.
- [4] 杨继松,刘景双,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及其营养动态[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1297-1302.
- [5] 武海涛,吕宪国,杨青,等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. 生态学报, 2006, 27(10): 4027-4035.
- [6] 杨继松,刘景双,于君宝. 三江平原小叶章湿地枯落物分解及主要元素变化动态[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 597-602.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 331-362.
- [8] 杜占池,樊江文,钟华平. 营养元素在红三叶叶片分解过程中的释放动态[J]. 草业学报, 2003, 20(7): 12-15.
- [9] Baker T T, lockaby B G, Conner W H, et al. Leaf litter decomposition and nutrient dynamics in four southern forested floodplain communities[J]. Soil Sci. Sol. J. Am., 2001, 65: 1334-1337.
- [10] Stephen E. Davis, Carlos C M, et al. Temporally dependent C, N, and P dynamics associated with the decay of *Rhizophora mangle* L. leaf litter in oligotrophic mangrove wetlands of the Southern Everglades[J]. Aquatic Botany, 2003, 75: 199-215.
- [11] Ribeiro C, Madeira M. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globules* grown under different water and nutrient regimes [J]. Forest Ecology Manage, 2002, 171: 31-41.
- [12] 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]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(4): 399-407.
- [13] 武海涛,吕宪国. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. 生态学报, 2007, 10(27): 4027-4035.
- [14] 刘信中,肖忠优,马建华. 江西九连山自然保护区科学考察与森林生态系统研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 414.
- [15] Whittaker R H. Dominance and diversity in land plant communities[J]. Science, 1965, 147: 250-260.
- [16] Enrquez S, Duarte C M, Sand J K. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: The importance of detritus C : N : P content[J]. Oecologia, 1993, 94(4): 457-471.
- [17] 孙强. 黄土丘陵区植物群落演替对土壤主要性状的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [18] 刘鸿雁. 缙云山森林群落次生演替中土壤特性动态变化及其影响因素研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005.