

文章编号: 1001-1498(2010)06-0845-05

北亚热带天然次生林群落演替对土壤有机碳的影响

马少杰, 李正才*, 周本智, 格日乐图, 孔维健, 安艳飞

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要: 以北亚热带受损天然次生林为研究对象, 探讨了植被演替对土壤有机碳的影响。结果表明: (1) 不同演替年限常绿阔叶林, 土壤有机碳含量均随土壤深度的增加而减少并最终趋于稳定; 土壤有机碳含量均随着演替年限的增加而不断增大, 增加幅度在土壤剖面上呈现波动性; 演替 20 a 到演替 40 a 群落土壤中的有机碳平均含量增加了 56.30% ($P < 0.05$)。 (2) 土壤有机碳储量随土层深度变化的趋势和土壤有机碳含量变化趋势基本一致: 总体上随深度增加而减少, 在 60~70 cm 土层出现波动; 不同土壤层次土壤有机碳储量也随着演替年限增加, 呈上升趋势, 增加幅度在土壤剖面上也呈现出波动性, 0~80 cm 土层有机碳储量平均增加了 56.01%。 (3) 该地区森林土壤碳储量总体上较低, 平均为 $79.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且 0~40 cm 土层贮存的碳量比例相对其它地区要大, 达到 70% 以上。 (4) 两种演替阶段, 土壤有机碳含量与全氮、水解氮、速效磷、速效钾、速效钙、速效镁离子的含量均极显著相关。因此, 应该加强亚热带森林的保护, 促进天然次生林的正向演替, 增加森林生态系统有机碳等的截留。

关键词: 北亚热带; 天然次生林; 群落演替; 土壤有机碳; 有机碳储量

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

Effects of Community Succession on Soil Organic Carbon in North Subtropical Areas

MA Shao-jie, LI Zheng-cai, ZHOU Ben-zhi, GERI-Letu, KONG Wei-jian, AN Yan-fei

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: This paper deals with the effects of community succession on soil organic carbon (SOC) in north subtropical areas. The results showed that: (1) In the succession of evergreen broad-leaved forest, the SOC content decreased and gradually kept a constant level with the increasing of soil depths; the SOC content increased continuously during the secondary forest succession; On the soil profiles, the increasing degree of SOC showed fluctuation; the SOC content of two different succession courses raised by 56.30% ($P < 0.05$). (2) The changing trend of SOC storage was almost the same as that of SOC content: on the whole, it decreased with soil depth, and appeared fluctuation in 60—70 cm; the SOC storage also increased in the community succession. On the soil profiles, the increasing degree of SOC storage showed fluctuation; the SOC storage in 0—80 cm soil layer raised by 56.01%. (3) As a whole, the SOC storage in this region was relatively low, with a mean value of $79.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the percentage of SOC storage in 0—40 cm soil layer was higher than that of the other forest areas, which was more than 70%. (4) In two restoration stages, the SOC content had a significant correlation with total nitrogen and available N, P, K, Ca and Mg, so it is necessary to enhance the protection of forests in north subtropical areas, which would be beneficial for the forest succession and enhance the C sequestration of forest ecosystems.

Key words: north subtropical China; secondary natural forest; community succession; SOC; organic carbon storage

土壤是植物群落的重要环境因子之一, 其在对植物群落发生作用的同时, 自身发育也受到植物群

收稿日期: 2009-09-14

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (RISF060701); 中国林业科学研究院院长基金项目 (CAFYBB2008006)

作者简介: 马少杰 (1985—), 女, 山东烟台人, 在读硕士。

* 通讯作者: 副研究员, 主要从事森林生态研究. E-mail: lizccaf@126.com

落的影响^[1], 植被的演替过程是植被和土壤相互影响和作用的过程^[2]。植被通过光合作用向土壤输送有机物质并从土壤吸收养分, 从而对有机碳的积累和周转产生深刻影响; 而土壤有机质积累和转化与植被演替及群落生物多样性之间也存在反馈关系, 是不同植物物种竞争替代和植物群落演替的重要推动力^[3]。由于演替是一个漫长的过程^[4], 这表明土壤的发育需要很长一段时间。以往的研究主要集中于对植物群落演替过程中土壤理化性质及肥力特征、土壤养分及酶活性的研究^[5-11], 而关于北亚热带地区受损天然次生林自然恢复演替过程中有机碳含量及储量变化的研究还较欠缺。本研究以北亚热带受损常绿阔叶林为研究对象, 旨在探讨植物群落正向演替过程中, 土壤有机碳含量及储量的变化规律, 对于揭示该地区天然次生林的自然恢复规律及土壤固碳潜力具有理论和实践意义。

1 试验地概况

1.1 试验地区概况

试验区位于浙江省富阳市庙山坞森林生态系统

定位研究站, 地理位置 119°56′ ~ 120°02′ E, 30°03′ ~ 30°06′ N, 属北亚热带季风气候, 雨量充沛, 气候温和, 年均气温 16.2℃, 年均降水量 1 464 mm, 无霜期 237 d。

该地区历史上为森林地带, 顶极群落是北亚热带常绿阔叶林, 由于过去对木材、薪炭需求量的增加以及农业活动的发展, 本地区天然原始林大多已遭到破坏, 森林被砍伐转化为次生林、农业用地和人工林等, 现存主要是次生林(以壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)和木兰科(Magnoliaceae)植物为主)和人工林, 人工林主要栽培杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)等。

1.2 样地选择及其基本情况

本研究采用相邻样地比较方法, 选择邻近的相同海拔、坡向, 成土母质、土壤条件和环境因子基本一致的次生林作为研究对象, 两种演替类型的次生林均由灌木林(薪炭林)封山育林而来。试验样地的基本情况见表 1。

表 1 试验样地基本情况

土地利用/ 覆盖类型	主要植物	平均树高/ m	平均胸径/ cm	立木密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	管理方式	林龄/a
演替	壳斗科、木荷、杉木为主	15.3	12.8	380	0.7 ~ 0.8	封山育林	20
演替	壳斗科、樟科为主	15.5	13.4	510	0.8 ~ 0.9	封山育林	40

注: 演替 为封山育林 20 a, 演替 为封山育林 40 a。

2 研究方法

在两种不同演替类型的天然次生林内, 设立面积为 20 m × 20 m 的调查样方(各重复 3 次), 进行每木调查(测量树木的树高、胸径、树冠冠幅), 计算出平均树高、胸径等样地基本参数。

在每一调查样地内, 先挖取 3 个典型土壤剖面, 观察剖面特征, 用 100 cm³ 环刀分层次测定每个剖面的土壤密度; 采用“S”形布设方法, 在各个样地内布设 5 个点, 除去枯枝落叶层后, 用 5 cm 内径的土钻分 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、50 ~ 60、60 ~ 70、70 ~ 80 cm 土层采集土样; 将各个样地的土样按照层次进行分层混合, 然后用四分法取出足够样品, 自然风干后过 2 mm 孔径的土壤筛, 以重铬酸钾法测定有机碳含量。其它土壤化学指标测定方法如下: 土壤全氮用凯氏定氮法测定, 土壤水解氮用碱解扩散法测定, 土壤速效

磷用 HCl-NH₄F 浸提, 酸溶—钼锑抗比色法测定, 土壤速效钙、速效镁、速效钾用乙酸铵浸提, 原子吸收光谱法测定。

根据土壤有机碳含量、土壤密度和土层深度计算土壤有机碳储量:

$$\text{土壤有机碳储量} = \sum_{i=1}^n (C_i \times d_i \times D_i)$$

式中: i 表示土壤层次, C_i 表示土壤有机碳含量, d_i 表示土壤密度, D_i 表示土壤深度。

方差分析采用 SPSS16.0 统计软件包中的相应程序进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同演替年限土壤有机碳含量垂直分布的差异

森林土壤有机碳来源于枯枝落叶及动物和植物的遗体, 以原状动植物遗体、碎屑或有机质形式存在

于土壤中,土壤碳库大小决定于生物物质输入量、分解释放碳量和进入水系统的损失碳量间的关系,与气候、干扰因子特征(时间、强度、方式等)及地上部分生物量变化密切相关。

植被不同演替年限下,土壤有机碳含量在土壤剖面的分布特征不同。由表2可以看出:土壤有机碳含量随着土层深度、演替年限的增加呈现一定的变化趋势:(1)不同演替年限下,土壤有机碳含量在其剖面层次中的分布趋势是一致的,随着土层的加深而逐渐减少,与方运霆等^[12]、郝文芳等^[13]的研究结果相一致,其减少幅度也随深度增加而下降,且有趋于稳定的趋势^[14],这说明土壤有机碳含量随深度增加而减少最终趋于稳定。(2)不同土壤层次有机碳含量随着演替年限的增加而不断增大。从统计学分析结果可以看出,植被演替过程中,不同土层有机碳含量增幅不同。有机碳含量在其剖面层次上的变

化幅度在40.99%~87.10%之间,呈现出较大波动,最大值出现在70~80 cm土层,最小值出现在30~40 cm土层(*t*检验表明,变化幅度在20~30、50~60 cm土层达到极显著水平,40~50、70~80 cm土层达到显著水平,其它层次差异不显著)。(3)演替20 a到演替40 a群落土壤中的有机碳平均含量增加了56.30%,*t*检验达到显著水平($P < 0.05$)。可见,北亚热带次生林植物群落正向演替有利于土壤碳的积累。随着群落的正向演替,植被与土壤相互作用,共同改善群落的生态环境(水分、热量、光照等),一方面增加了凋落物、细根的生物量;另一方面有利于土壤微生物的活动,增加了凋落物、细根有机碳库归还到土壤的有机碳量。本研究中,演替20 a群落中的杉木,其凋落物相对其它树种不易降解,这也是该群落有机碳含量低于演替40 a群落的原因之一。

表2 不同演替年限土壤有机碳含量垂直分布特征比较

土壤层次/cm	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)			统计检验
	20 a	40 a	变化幅度/%	
0~10	26.47(2.96)	38.00(11.81)	43.56	$t=1.640, P=0.176$
10~20	12.09(1.78)	22.08(6.58)	82.63	$t=2.537, P=0.064$
20~30	9.32(0.76)	14.66(1.60)	57.30	$t=5.226, P=0.006$
30~40	7.66(1.22)	10.80(1.75)	40.99	$t=2.547, P=0.063$
40~50	5.44(0.36)	8.50(1.70)	56.25	$t=3.042, P=0.038$
50~60	4.97(0.25)	7.95(0.84)	59.96	$t=5.920, P=0.004$
60~70	4.69(1.58)	7.22(0.65)	53.95	$t=2.565, P=0.062$
70~80	3.72(0.62)	6.96(1.29)	87.10	$t=3.920, P=0.017$
均值	9.29(0.78)	14.52(1.86)	56.30	$t=4.481, P=0.011$

注:括号内数值为标准差,下同。

3.2 不同演替年限土壤有机碳储量的垂直分布特征及比较

不同演替年限下,土壤有机碳储量在土壤剖面上的分布特征及差异见表3。(1)土壤碳储量是土壤有机碳含量、土壤密度和土壤厚度三者的乘积,由于不同演替年限土壤密度差异较小,因此,不同演替年限土壤有机碳储量的垂直分布特征与有机碳含量的基本一致。随着群落演替的进行,在土壤剖面上,不仅有机碳储量随深度增加而减少,其变化幅度也随深度增加而波动,且有趋于相对稳定的趋势。(2)群落不同土壤层次有机碳储量随着演替年限的增加而呈现上升趋势;但不同层次有机碳储量增幅不同,变化幅度在41.03%~86.93%之间波动。在70~80 cm土层,从演替20 a到演替40 a,有机碳储量增加的幅度最大,达到86.93%,*t*检验达到显著水平($P < 0.05$)。从统计分析结果可以看出,40~

50 cm和70~80 cm土层达到显著水平,20~30 cm和50~60 cm土层极显著上升,其它土层未达到显著水平。(3)演替40 a群落的土壤有机碳储量显著大于演替20 a的群落,0~80 cm土层有机碳储量平均增加了56.01%($t=4.512, P=0.011$)。0~40 cm土层有机碳储量是总有机碳储量的主要组成部分,累计贡献率达到70%以上。在不同演替年限下,不同土壤层次有机碳储量对总有机碳储量的贡献率相似,这说明森林阶段的群落自然演替对有机碳储量在土壤剖面上的分布情况影响不大,这一观点还有待于进一步验证。

3.3 土壤有机碳含量与其它土壤养分元素的相关分析

全氮与土壤有机碳含量极显著正相关(20 a, $r=0.984$; 40 a, $r=0.973$),这是因为土壤有机质是森林土壤氮素最根本的来源;水解氮包括无机的矿物态氮和部分有机质中易分解的较简单的有机态

氮,它是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮的总和^[15],因此水解氮与土壤有机碳含量及质量有关,本研究中有机碳含量与水解氮相关性极显著。本研究中,演替 20 a 和 40 a 的森林群落土壤有机碳含量与速效磷、速效钾、速效钙、速效镁均呈

现极显著正相关(表 4)。随着天然次生林植被的恢复,伴随着土壤有机碳含量、储量的增加,土壤全氮、水解氮、速效磷、速效钾、速效钙、速效镁离子的含量也呈现增加的趋势,表现为植被恢复进程中土壤养分元素的积累过程。

表 3 不同演替年限土壤有机碳储量垂直分布特征的差异

土壤层次/ cm	20 a		40 a		变化幅度/ %	统计检验
	有机碳储量/ (t·hm ⁻²)	累计贡献率/ %	有机碳储量/ (t·hm ⁻²)	累计贡献率/ %		
0~10	22.23(2.49)	35.97	31.91(9.92)	33.09	43.54	$t=1.639, P=0.176$
10~20	9.69(1.43)	51.64	17.68(5.27)	51.43	82.46	$t=2.535, P=0.064$
20~30	7.59(0.62)	63.92	11.93(1.29)	63.80	57.18	$t=5.240, P=0.006$
30~40	6.80(1.09)	74.92	9.59(1.55)	73.74	41.03	$t=2.548, P=0.063$
40~50	4.47(0.30)	82.16	6.98(1.40)	80.98	56.15	$t=3.040, P=0.038$
50~60	4.21(0.21)	88.97	6.74(0.71)	87.97	60.10	$t=5.913, P=0.004$
60~70	3.53(1.19)	94.68	5.45(0.49)	93.62	54.39	$t=2.572, P=0.062$
70~80	3.29(0.55)	100.00	6.15(1.15)	100.00	86.93	$t=3.910, P=0.017$
0~80	61.81(5.19)	—	96.43(12.24)	—	56.01	$t=4.512, P=0.011$

表 4 土壤有机碳含量与其它土壤养分的相关性

演替年限/a	样本数(n)	有机碳含量	全氮	水解氮	速效磷	速效钾	速效钙	速效镁
20	24	1	0.984**	0.942**	0.694**	0.740**	0.743**	0.917**
40	24	1	0.973**	0.986**	0.535**	0.910**	0.854**	0.970**

注: ** 表示 0.01 极显著水平的双尾检验, * 表示 0.05 显著水平的双尾检验。

4 结论与讨论

(1) 对北亚热带受损常绿阔叶林样地的研究表明,不同土壤层次有机碳含量随植物群落演替年限增加而增大,且不同土层有机碳含量增幅不同。本研究中,有机碳含量在其剖面层次上的变化幅度在 40.99%~87.10% 之间,呈现较大波动。由于植物群落与土壤相互作用,群落演替对不同土壤层次有机碳含量影响波动较大,并未呈现出群落演替对土壤下层的影响比上层大^[16]或小^[17]的趋势,这与研究植被类型不同有关。张俊华等^[18]对黄土高原植被恢复的研究也表明,所有植被恢复的土壤中,植被类型不同,土壤剖面上有机碳的空间分布有明显差异,各层次之间的对比关系不尽相同。

(2) 研究表明,演替 40 a 的群落土壤有机碳储量显著大于演替 20 a 的群落,0~80 cm 土层有机碳储量平均增加了 56.01% ($t=4.512, P=0.011$)。随着演替的进行,土壤碳储量也逐渐增加。Kovel^[19]等对荷兰流动沙地原生演替过程的研究也发现,随着演替的进行,土壤碳储量有不断增加的趋势,在演替 121 a 后形成阔叶混交林,植被和土壤的碳储量达到最大值。

(3) 本研究样地森林土壤属黄红壤类型,土壤碳储量在 61.81~96.45 t·hm⁻²,平均 79.13 t·hm⁻²,明显低于我国东部地区该类型土壤碳储量(117.6 t·hm⁻²)^[20],也低于周玉荣等^[21]对我国常绿阔叶林的报道(平均 101.30 t·hm⁻²),说明该地区森林土壤碳储量总体上较低,这可能与研究区域的森林植被组成^[22]、森林自然演替阶段有关。Knops 等^[23]认为植被组成对土壤中碳的积累有重大作用。也可能与研究时所取土壤深度不同有关。本研究采集 0~80 cm 土样,而王绍强等^[20]对我国陆地碳储量估算中,采集的土层为 0~100 cm。根据 Batjes^[24]对全球各类型森林土壤碳储量的研究,0~100 cm 的土壤碳储量中,0~30 cm 和 0~50 cm 土层所占的比例在 37%~59% 和 62%~81% 间,平均为 49% 和 67%;而土壤碳储量随土层加深而减少,大于 80 cm 所储存的碳量对于碳储量估计是否达到可忽略的程度,有待进一步研究。研究方法不同也是原因之一,对森林土壤碳储量估算,大多基于土壤普查^[20],或收集部分文献上的数据^[21],二者皆因调查时对山区或山体较高位置抽样较少,或报道的森林生态系统类型选择偏向性而使其研究结果偏高。

根据 Detwiler^[25]关于热带和亚热带地区不同土

地利用方式对土壤碳库影响的研究,0~40 cm土层所贮存的碳量占0~100 cm土层的35%~80%,平均为57%;而本研究中,演替20 a的森林土壤0~40 cm土层的土壤碳贡献率为73.74%。可见,该地区森林土壤表层碳储量比例相比其它地区要高,这也从侧面反映出该地区土壤脆弱,人为干扰活动更易造成土壤碳的损失^[24];所以,应加强亚热带天然次生林的保护,减少人为活动对森林的干扰,增加森林生态系统有机碳等的截留。

(4) 随着植被演替的进行,土壤有机碳含量与全氮、水解氮,速效磷、速效钾、速效钙、速效镁均达到极显著正相关。很多研究表明^[5,16,26-27],在森林演替过程中,土壤全氮与有机碳含量呈现极显著正相关。本研究中,群落演替20 a到40 a,速效磷与土壤有机碳的相关系数变小,仅由此不能推断出随着演替的进展,两者相关系数变小,因为土壤中速效磷随着演替的进展变化较复杂,其含量及与土壤有机碳的相关系数大小与演替时间、土壤剖面深度^[26]等多种因素有关。张庆费等^[16]关于浙江天童植物群落的研究也表明,速效磷含量与有机碳含量呈显著正相关,而据温仲明等^[28]对黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复的研究,有机碳与速效磷相关性不明显,张俊华等^[18]关于黄土高原的相关研究认为,植被恢复过程中土壤速效磷增加非常有限,甚至在一些植被上出现负增长;Vitousek^[29]则认为,速效磷随着演替的进行总体逐渐降低,在演替初期植物可获得的磷在短期内是增加的,但很快因植物固定和转化而下降,所以磷在很多情况下成为限制因子。因此,随着森林的演替,速效磷含量及其与有机碳含量的相关性如何变化还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 苏智先,王仁卿. 生态学概论[M]. 北京:高等教育出版社,1993:88-91
- [2] 韩兴国,黄建辉,姜治平. 关键种概念在生物多样性保护中的意义与存在的问题[J]. 植物学通报,1995,15(1):9-14
- [3] 张全发,郑重,金义兴. 植物群落演替与土壤发展之间的关系[J]. 武汉植物学研究,1990,8(4):325-334
- [4] Drury W H, Nisbet I C T. Succession[J]. *Journal of the Arnold Arboretum*, 1973, 54:331-368
- [5] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2041-2046
- [6] 张俊华,常庆瑞,贾科利,等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):38-41
- [7] 张庆费,宋永昌,由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. 生态学报,1999,19(2):174-178
- [8] 宋会兴,苏智先,彭远英. 渝东山地黄壤肥力变化与植物群落演替的关系[J]. 应用生态学报,2005,16(2):223-226
- [9] 余彬彬,金则新,李钧敏. 常绿阔叶林次生演替系列群落土壤微生物生物量及酶活性[J]. 西北林学院学报,2008,23(5):30-33
- [10] 张成娥,陈小利. 黄土丘陵区不同撂荒年限自然恢复的退化草地土壤养分及酶活性特征[J]. 草地学报,1997,5(3):195-200
- [11] 胡斌,段昌群,王震洪,等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响[J]. 土壤学报,2002,39(4):604-608
- [12] 方运霆,莫江明,彭少麟,等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用[J]. 生态学报,2003,23(9):1685-1694
- [13] 郝文芳,梁宗锁,陈存根,等. 黄土丘陵沟壑区弃耕地群落演替与土壤性质演变研究[J]. 土壤肥料科学,2005,21(8):226-231
- [14] 周印东. 子午岭植被演替过程中土壤有机碳积累与变化[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2003:1-70
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:62-78
- [16] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童森林公园植物群落演替对土壤化学性质的影响[J]. 应用生态学报,1999,10(1):19-22
- [17] 王国梁,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报,2002,22(1):1-5
- [18] 张俊华,常庆瑞,贾科利,等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):38-41
- [19] De Kovel C G, Van Mierlo E M, Wilms Y J O, *et al.*. Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age[J]. *Plant Ecology*, 2000, 149(1):43-50
- [20] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544
- [21] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522
- [22] 方运霆,莫江明,Sandra Brown,等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报,2004,24(1):135-142
- [23] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment[J]. *Ecology*, 2000, 81(1):88-98
- [24] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2):151-163
- [25] Detwiler R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soil[J]. *Biogeochemistry*, 1986, 2(1):67-93
- [26] Jia G M, Cao J, Wang C, *et al.*. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1):117-125
- [27] 张祖荣,古德洪. 重庆四面山次生植被不同演替阶段土壤理化性质的比较研究[J]. 林业科学研究,2008,33(6):21-25
- [28] 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2025-2029
- [29] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests[J]. *Ecology*, 1984, 65(1):285-298