

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

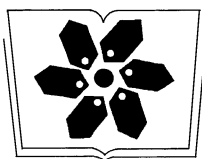
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 23 期
Vol.30 No.23
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 23 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

1940—2002 年长江中下游平原乡村景观区域中耕地类型及其土壤氮磷储量的变化	武俊喜,程 序,焦加国,等 (6309)
海洋生态资本概念与属性界定	陈 尚,任大川,李京梅,等 (6323)
海洋生态资本价值结构要素与评估指标体系	陈 尚,任大川,夏 涛,等 (6331)
黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征	杜有新,潘根兴,李恋卿,等 (6338)
长白山阔叶红松林样地槭属树木木生真菌的群落组成和分布	魏玉莲,戴玉成,袁海生,等 (6348)
内蒙古退化荒漠草原土壤细菌群落结构特征	吴永胜,马万里,李 浩,等 (6355)
盐度对尖瓣海莲幼苗生长及其生理生态特性的影响	廖宝文,邱凤英,张留恩,等 (6363)
基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析	胡海清,赵致奎,王晓春,等 (6372)
不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响	赵紫华,石 云,贺达汉,等 (6380)
黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系	刘继亮,李锋瑞,刘七军,等 (6389)
刺槐树冠光合作用的空间异质性	郑 元,赵 忠,周 慧,等 (6399)
南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素	宋星宇,刘华雪,黄良民,等 (6409)
怒江三种裂腹鱼属鱼类种群遗传结构	岳兴建,汪登强,刘绍平,等 (6418)
大型水生植物对重金属的富集与转移	潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等 (6430)
依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线	徐兆礼,陈佳杰 (6442)
正交试验法分析环境因子对苦草生长的影响	朱丹婷,李铭红,乔宁宁 (6451)
基于中分辨率 TM 数据的湿地水生植被提取	林 川,官兆宁,赵文吉 (6460)
基于 CVM 的三江平原湿地非使用价值评价	敖长林,李一军,冯 磊,等 (6470)
耕地易地补充经济补偿的生态价值——以江阴市和兴化市为例	方 斌,杨 叶,郑前进,等 (6478)
自然旅游地居民自然保护态度的影响因素——中国九寨沟和英国新森林国家公园的比较	程绍文,张 捷,徐菲菲 (6487)
基于 PSR 方法的区域生态安全评价	李中才,刘林德,孙玉峰,等 (6495)
灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响	滕中华,智 丽,吕 俊,等 (6504)
秦岭北坡不同生境栓皮栎实生苗生长及其影响因素	马莉薇,张文辉,薛瑶芹,等 (6512)
子午岭三种生境下辽东栎幼苗定居限制	郭 华,王孝安,朱志红 (6521)
温度、盐度对龟足胚胎发育和幼虫生长的联合影响	饶小珍,林 岗,张殿彩,等 (6530)
锡林郭勒盟气候干燥度的时空变化规律	王海梅,李政海,韩国栋,等 (6538)
北京市水足迹及农业用水结构变化特征	黄 晶,宋振伟,陈 阜 (6546)
延安北部丘陵沟壑区退耕还林(草)成效的遥感监测	孙智辉,雷延鹏,卓 静,等 (6555)
冰川前缘土壤微生物原生演替的生态特征——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王晓霞,张 涛,孙 建,等 (6563)
储藏方式和时间对三峡水库消落区一年生植物种子萌发的影响	申建红,曾 波,施美芬,等 (6571)
云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征	刘万德,苏建荣,李帅锋,等 (6581)
青藏高原高寒矮蒿草甸碳增汇潜力估测方法	曹广民,龙瑞军,张法伟,等 (6591)
基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟	顾峰雪,陶 波,温学发,等 (6598)
太原盆地土壤呼吸的空间异质性	张义辉,李洪建,荣燕美,等 (6606)
专论与综述	
热带森林碳汇或碳源之争	祁承经,曹福祥,曹受金 (6613)
景观对河流生态系统的影响	欧 洋,王晓燕 (6624)
自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响	杨连新,王云霞,赵秩鹏,等 (6635)
研究简报	
基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例	王女杰,刘 建,吴大千,等 (6646)
鹤伴山国家森林公园土壤甲螨群落结构	许士国,付荣恕 (6654)
栓皮栎人工林树干液流对不同时间尺度气象因子及水面蒸发的响应	桑玉强,张劲松,孟 平,党宏忠,等 (6661)
赤眼蜂发育速率对梯度恒温的响应	陈洪凡,岑冠军,黄寿山 (6669)
学术信息与动态	
GIS 和遥感技术在生态安全评价与生物多样性保护中的应用	李文杰,张时煌 (6674)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 42 * 2010-12	

黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征

杜有新^{1,2}, 潘根兴^{1,*}, 李恋卿¹, 胡忠良¹, 王新洲¹

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 江西省、中国科学院庐山植物园, 庐山 332900)

摘要:喀斯特生态系统退化导致植被群落结构简单、系统生态功能逐渐丧失与稳定性不断下降, 这些退化特征皆与系统生物量结构和生物地球化学循环特征密切相关。采用实地调查和典型取样方法, 探讨了贵州省普定县 3 个不同退化程度的喀斯特生态系统生物量结构与养分分布格局。结果表明: (1) 随着生态系统不断退化, 植被地上部分生物量和土壤有效态养含量呈下降趋势, 植物营养物质通过凋落物返还土壤的比例也呈类似趋势, 而细根和草本植物等活性生物组分的生物量却呈现上升趋势。 (2) 对应于生物量结构的变化, 各组分主要养分储量也呈现相似的变化特征。乔木林枯落物层养分(N 和 P) 累积量显著高于草本层和细根部分, 而灌木林和灌草丛系统草本层和细根部分的养分储量超过或接近枯落物层。 (3) 随着生态系统不断退化, N 和 P 的生物吸收率、生物返还率、生物迁移率和生物分解率出现明显变化, 生物吸收率和生物分解率呈现明显下降趋势, 而生物迁移率和生物返还率却表现出上升趋势。

关键词:喀斯特生态系统; 植被退化; 生物量结构; 养分; 循环特征

Partitioning of vegetation biomass, nutrient storage and cycling of degraded ecosystems from mountainous Karst region, central Guizhou, China

DU Youxin^{1,2}, PAN Genxing^{1,*}, LI Lianqing¹, HU Zhongliang¹, WANG Xinzhou¹

1 Institute of Resources, Ecosystem and Environment for Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2 Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Lushan 332900, China

Abstract: The system functioning and stability for resilience and sustainability has been increasingly concerned with restoration and re-establishment of degraded karst ecosystems in the areas with rock desertification in Southwest China. However, decline in vegetation biomass and nutrient pool has been generally associated with changes in ecosystem functioning and sustainability. To address the relations between biomass, nutrient storage and ecosystem functioning, the partitioning of biomass and major nutrients among the different vegetation pools were studied by a pilot study using a degradation sequence of three karst ecosystems with different degree of vegetation decline from Puding County, Central Guizhou, South West China. The results showed that: (1) there was a decreasing trend both in vegetation biomass above ground and in soil nutrient availability as well as nutrient returning through littering, an increasing trend of fine root biomass and herbaceous biomass with the degradation trend of the ecosystems. The organic matter storage in forest floor was respectively 10 times as the herbaceous biomass and 2 times as the fine root biomass in the forest stand (FO). Whereas, the herbaceous biomass and fine root biomass were 3.5 times and 2.1 times as that of floor organic matter in the shrubland stand (SH), and 2.4 times and 1.4 times as that of floor organic matter in the shrub-and-grassland (SHG) respectively. (2) The nutrient accumulations in ecosystem components varied with the vegetation biomass pattern. The N and P accumulations in forest floor organic matter were significantly higher than that in herbaceous layer and in fine roots in the FO, while the N and P accumulations in herbaceous layer and in fine roots were higher than or similar to that in floor

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“973”(2006CB403205)

收稿日期:2010-01-03; **修订日期:**2010-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

organic matter in the SH and the SHG. (3) There was a sharp decline in nutrient uptake and decomposition percentage, with an increase in percentage of nutrient translocated and returned to soil with the increasing degradation in vegetation from forest to grassland. In particular, the bio-migration and bio-return ratios of N was in the order of SHG > SH > FO, but its uptake and decomposition ratio in order of FO > SHG > SH and FO > SH > SHG respectively. Similarly, the migration and decomposition ratios of P in FO > SHG > SH and FO > SH > SHG, and bio-absorption ratio as SH > FO > SHG, and its bio-return ratio in order of SH > SHG > FO.

The results showed that the nutrient return to soil through litterfall was gradually decreased, whereas the biomass of fine roots increased gradually with the increasing trend of vegetation decline. This suggested that major nutrients such as N have undergone a relatively intense translocation and been exhausted in rhizospheric zone for their use in vegetable parts due to loss under vegetation decline in degraded ecosystems. Compared with the forest stand, the shrubland and the shrub-and-grassland have been vulnerable due to lower capability in self-sustaining and regulating under serious disturbances. Finally, it is suggested that the biogeochemical characterization of major nutrients would be an important sector for the functional stability of karst ecosystems.

Key Words: Karst ecosystems; vegetation decline; biomass partitioning; major nutrients; elemental cycling

森林生态系统退化就是植被群落结构与功能背离顶极群落的演变过程,而喀斯特生态系统退化的实质就是植被生物量减退和系统稳定性不断下降^[1]。与生态系统结构稳定性相比,关于功能稳定性的研究较少^[2],而功能稳定性与生态系统的系统容量和养分循环特征密切相关,如不同生态系统中物质和能量的流动速率,明显影响了系统抗干扰能力^[3]。由于森林生态系统中的植被、土壤和枯落物组分对各种干扰表现出不同的易变性^[2],显著影响着生态系统生物地球化学过程,因此退化生态系统各组分的生物量、养分储量及其动态变化是研究森林生态系统稳定性的物质基础。

养分分布格局及其生物利用效率是评价生态系统健康状况的重要指标^[4],它们因地域及生态系统不同表现出较大的差异性^[2]。喀斯特山区自然生态系统很脆弱^[5],土壤保水能力差,土壤贫瘠,而且土壤中营养元素的赋存形态、迁移特征及生物有效性在很大程度上又受到富钙的岩溶地球化学背景制约^[6]。关于西南喀斯特地区物质循环方面的研究,之前侧重于岩溶方面较多^[7-10],关于生物地球化学方面的研究近期受到较大关注^[11-12],但关于喀斯特山区植物群落营养元素分布格局、生命元素循环特征的研究尚不多见^[13]。本研究通过不同退化程度的植被生态系统养分分布格局和养分稳定性分析,试图了解退化喀斯特生态系统的生态过程和系统稳定性的养分机制,以期为喀斯特区农林业生产和受损生态系统的恢复与重建提供理论依据。

1 研究区概况

研究地点位于贵州省安顺地区普定县城关镇赵家田村,受热带和亚热带季风气候的影响,喀斯特过程十分强烈,致使本区发育成一个典型的喀斯特化高原山地^[5]。研究区海拔在 1300—1500m 之间,气候温和,为典型湿润性季风气候,年平均气温 14—15.9℃;雨量充沛,年降雨量 1100—1400mm 且约 70% 集中于 5—9 月份。由于碳酸盐岩广泛分布,致使非地带性土壤——石灰土普遍发育,其分布面积约占本区面积的 30%—40%。区内发育的常态地带性植被是中亚热带湿润性常绿阔叶林^[14],但由于受到石灰性土壤发育缓慢的限制,多发育成各种非常态的喀斯特森林。尤其是人类活动的频繁干扰,区内喀斯特强烈发育,次生性喀斯特灌丛类型较多而且分布广泛。

研究对象为岩性、海拔和地形等条件均为相似且相邻的 3 个独立的喀斯特峰丛山丘,分别为灌草丛 (SHG)、灌木林 (SH) 和次生乔木林 (FO) 3 种不同的植被覆盖类型。灌草丛是在 20 世纪 40 年代以前森林被毁后,在人类频繁樵采干扰下逐渐发育的次生性植被,灌木林是在 20 世纪 60 年代上层林木皆伐后逐渐发育的次生灌木林,而乔木林只受到轻度择伐干扰。直到 20 世纪 80 年代末,本地区实施“天保林保护工程”后,伐木和樵采基本停止,但仍然存在放牧的干扰(当地林业部门提供)。乔木林乔木树种 19 科 23 属 37 种,优势

乔木树种有圆果化香 (*Platycarya longipes* Wu.) 和白栎 (*Quercus fabri* Hance), 它们重要值分别占乔木层的 95.36% 和 72.66%, 伴生树种有刺楸 (*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.)、云南樟 (*Cinnamomum glanduliferum* (Wall.) Nees); 亚乔木层优势树种有月月青 (*Itea ilicifolia* Oliv.) 和光叶海桐 (*Pittosporum glabratum* Lindl.), 它们重要值分别占乔木层的 57.37% 和 29.71%; 伴生树种有椴木石楠 (*Photinia davidsoniae* Rehd. et Wils.)、密花树 (*Rapanea nerifolia* (Sieb. et Zucc.) Mez.)。灌木植物具有 23 科 27 属 32 种, 其中藤本植物 12 科 13 属 15 种, 优势树种有铁籽 (*Myrsine Africana* L.)、密花树和贵州鼠李 (*Rhamnus esquirolii* Lévl.) 等。乔木林群落内草本植物盖度最低 (<20%), 草本植物有 21 科 36 属 39 种, 主要草本植物有求米草 (*Oplismenus undulatifolius* (Ard.) Roem. et Schult.), 三脉叶紫菀 (*Aster ageratoides* Turcz.), 苔草 (*Carex lanceolata* Boott), 芒齿耳蕨 (*Polystichum hecatopteron* Diels), 镰草 (*Scirpus trqueter* L.), 狗脊 (*Woodwardia japonica* (L. f) Sm), 宝铎草 (*Disporum seeeile* D. Don), 短角淫羊藿 (*Epimedium brevicornum* Maxim.) 等。灌木林草本植物 32 科 39 属 48 种, 其中藤本植物 9 科 10 属 10 种, 优势灌木为小果蔷薇 (*Rosa cymosa* Tratt.), 竹叶椒 (*Zanthoxylum planispinum* Sieb. et Zucc.), 火棘 (*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) L.); 灌木林草本植物盖度一般, 草本植物 31 科 45 属 51 种, 主要草本植物有野苏子 (*Elsholtzia flava* (Benth.) Trin. Makino), 千里光 (*Senecio scandens* Buch.-Ham. ex D. Don), 假俭草 (*Eremochloa ophiuroides* (Munro.) Hack.), 荩草 (*Arthraxon hispidus* (Trin.) Makino), 天胡荽 (*Hydrocotyle sibthorpoioides* Lam.), 积雪草 (*Centella asiatica* (L.) Urban) 等。灌草丛草本植物 19 科 24 属 27 种, 主要灌木与灌木林相似; 草本层盖度最高 (>50%), 草本植物有 21 科 39 属 41 种, 其中藤本植物 7 科 7 属 7 种, 主要草本植物有野苏子, 牛鞭草, 蒲公英 (*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.), 荩草, 积雪草等。

3 个研究样地的土壤基本性质存在较大差异^[15] (表 1)。灌木林 (SH) 土壤厚度 (soil depth, SD) 和植被覆盖度 (vegetation coverage, VC) 与乔木林 (FO) 没有差异, 而它们与灌草丛 (SHG) 之间具有极显著差异 ($P < 0.01$)。灌草丛和灌木林样地土壤含水量 (water content, WC) 和有机碳 (soil organic carbon, SOC) 含量之间没有差异, 与次生乔木林达极显著差异 ($P < 0.01$); 关于土壤有效氮 (available nitrogen, AN) 和有效磷 (available phosphorus, AP), 3 个样地之间存在极显著差异 ($P < 0.01$)。

表 1 喀斯特生态系统研究样地概况及土壤基本属性 (平均值 $\pm$ 标准差)
Table 1 Conditions and soil properties of the studied karst ecosystems (mean $\pm$ S. D.)

植被类型 Vegetation types	海拔/m Elevation (m. a. s. l.)	植被盖度/% Vegetation coverage	土壤 pH Soil pH value	土壤厚度/cm Soil depth	土壤有机碳 /(g/kg) Soil organic carbon	土壤有效氮 /(mg/kg) Available nitrogen	土壤有效磷 /(mg/kg) Available phosphorus
灌草丛 (SHG) Shrub-and- grassland	1312—1415	30.7 $\pm$ 22.6B	7.6 $\pm$ 0.6	22.9 $\pm$ 25.2B	51.32 $\pm$ 11.70B	244.60 $\pm$ 72.39C	1.66 $\pm$ 0.57 C
灌木林 (SH) Shrubland	1286—1425	70.4 $\pm$ 32.5A	7.8 $\pm$ 0.3	41.35 $\pm$ 31.35A	49.68 $\pm$ 20.50B	338.79 $\pm$ 73.23B	2.55 $\pm$ 0.79 B
乔木林 (FO) Forest	1309—1456	83.5 $\pm$ 12.3A	6.9 $\pm$ 0.7	42.19 $\pm$ 27.16A	65.56 $\pm$ 10.74A	430.46 $\pm$ 87.22A	3.96 $\pm$ 1.28 A

数值后不同大写字母表示 0.01 水平上差异显著

2 材料与方法

2.1 植被调查与地上生物量估算

采用典型样地调查方法^[16-17]。2007 和 2008 年的 7—8 月, 在 3 个不同退化程度的植被群落内选择代表地段 (海拔 1350—1450 m) 设置临时样地, 样地一般位于山坡的中上部, 坡度 25—35°, 处于南坡及东南坡。灌木林和灌草丛样地面积 8m $\times$ 25m, 乔木林为 30m $\times$ 40m, 并在每个群落内沿等高线和海拔梯度随机设置样方 5 个 (灌木林和灌草丛 20m², 乔木林 200m²), 共计 2400m²。灌草丛和灌木林群落临时样地划分成 10 个 5m $\times$ 4m 的样方; 乔木林群落样地划分为 10 个 15m $\times$ 8m 的样方, 每个样方内再设置 1 个 5m $\times$ 4m 小样方。在每个样方内调查乔木树种树高、胸径 (D_{bh}) 和株数, 灌木高度、地径 (D_{bs}) 和株数 (包括乔木幼树与幼苗), 同时记录

样地的海拔、坡度等环境指标和各植被层次的覆盖度。在每个 $5\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方内另随机设置 1 个 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的小样方作草本调查,采用刈割法统计草本生物量(herbaceous biomass, HB);并且在每个 $5\text{m} \times 4\text{m}$ 的样方内随机设置 1 个 $2\text{m} \times 1\text{m}$ 的现存枯落物(forest floor organic matter, FLOM)收集样方。

建立新的生物量模型需要砍伐一定量的样木,对森林植被的破坏较大,因此本研究采用喀斯特地区已有模型^[18-19],木本植物地上部分生物量采用如下模型(1)和(2)估算:

$$\text{乔木地上部分生物量 } AGB_t = 0.0775 \times \sum_{i=1}^{S_t} \sum_{j=1}^{N_t} (D_{bh}^2 H)_{ij}^{0.8941} \quad (n=30, r^2=0.9872) \quad (1)$$

$$\text{灌木地上部分生物量 } AGB_s = 0.1319 \times \sum_{i=1}^{S_s} \sum_{j=1}^{N_s} (D_{bs}^2 H)_{ij}^{0.5920} \quad (n=232, r^2=0.8842) \quad (2)$$

上述相对生物量公式中的 D_{bh} 为乔木胸径, D_{bs} 为灌木地径, H 为乔木或灌木树高, S_t 和 S_s 分别为乔木和灌木的种数, N_t 和 N_s 分别为乔木和灌木的株数。

2.2 细根采集及其生物量调查

细根调查采用土钻法^[20] 2008 年 10 月,从每个样地随机选取每个优势树种 3—5 个标准植株,在树冠覆盖区按东南、西南、正北 3 个方位并距树干 10—20cm 处和树冠外空旷处,按 0—5cm, 5—10cm 和 10—15cm 土层用内径 8cm 的土钻挖取土芯(野外调查发现细根主要集中于土壤 20cm 以上的土层)。取出的土芯装入自封袋带回实验室,所有根系样品经流水漂洗、过筛,分拣根系,区分出各目的树种根和其它根,剔除草根。根据根系外形、颜色、弹性、根皮与中柱分离的难易程度来区分活死根,并进一步分成 2 个径级($\leq 2\text{mm}$ 和 $> 2\text{mm}$),所有根系样品放在盖有玻璃的网格纸上(mm),用镊子拉直两端测定根系长度(精确到 0.5 mm)。称取鲜重后置于烘箱(70°C)并烘干(24h)至衡重,电子天平称取干重,所有细根生物量分土层和径级按公式(3)计算。分层(0—5cm, 5—10cm 和 10—15cm)和分树种统计 3 样地 192 个土芯样品中各参数的平均值,将每个土芯中 3 个土层的生物量和根长相加,得到各土芯生物量值,并根据植被覆盖度换算为单位面积根系生物量(t/hm^2)。

$$\text{细根生物量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \text{平均每根土芯细根干重}(\text{g}) \times 100 / (\pi \times (8/2)^2)(\text{cm}^2) \quad (3)$$

2.3 植物与土壤样品采集及实验分析

植物样品采集与处理 2008 年的 7—8 月,在样地内随机选择每个树种 3—5 株标准植株,分别采取树干(包含木质部和韧皮部)鲜重约 100g 和鲜叶约 30g,并收集 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 草本样方内的草本植物。2008 年 12 月,通过摇晃树枝法采集落叶样品,每个样品(分样地和树种)视情况收集落叶 5—20g 左右。同时在 $2\text{m} \times 1\text{m}$ 现存枯落物样方内收集全部枯落物并分枝叶称取鲜重,再分别按一定比例随机称取鲜重 50—100g 样品。所有植物样品放入 70°C 烘箱烘干至衡重(24h),称取干重,根据样品含水率测算样地草本植物和枯落物总生物量。所有植物和枯落物样品分析均参照鲁如坤推荐的方法^[21];全氮采用凯氏定氮法测定,磷采用酸溶-钼锑抗比色法,而钾为酸溶-火焰光度计法测定,钙和镁则采用双酸($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$)消解-原子吸收法(PE5100PC)测定。

土壤样品采集与分析 2008 年的 7—8 月,在样地内随机采集 30—50 个表层土样(0—10cm),取样 500g 左右分装于自封袋带回实验室。土样经风干、去除植物根系后过 60 目筛备用。土壤 pH 值采用(1:2.5 的土/水质量比)电极电位法测定,土壤有机碳为重铬酸钾外加热氧化法,土壤全氮采用凯氏定氮法,速效氮采用碱解扩散法,全磷采用高氯酸-硫酸消煮钼锑抗比色法,速效磷采用 0.5mol/L NaHCO_3 提取-钼锑抗比色法测定^[21]。

2.4 数据处理与统计分析

实验数据分析采用单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey(HSD)标准进行处理间均数显著性检验,统计计算均在 SPSS13.0 和 ORIGIN70 上进行。

3 结果

3.1 生态系统生物量分布

不同生态系统之间及系统组分之间的生物量存在显著差异(表 2)。乔木林木本植物地上部分生物量显

著高于灌木林和灌草丛地上生物量,乔木林细根生物量也显著高于灌木林($P < 0.05$)和灌草丛($P < 0.01$)细根生物量,但乔木林活细根生物量与灌木林没有差异,而且乔木林草本层生物量显著低于灌木林($P < 0.01$)和灌草丛($P < 0.05$)。灌木林草本植物与细根生物量显著高于灌草丛($P < 0.05$),枯落物层生物量与灌草丛没有差异。

3 个生态系统内不同组分占本系统总生物量的比例差别明显。草本层、枯落物层和细根分别占乔木林总生物量的 0.25%、2.04% 和 1.33%,在灌木林系统中分别是 22.09%、6.37% 和 13.47%,在灌草丛系统中分别为 20.65%、8.68% 和 12.00%。在退化严重的灌草丛和灌木林中,细根生物量显著高于地面现存枯落物层生物量($P < 0.05$);而乔木林中现存枯落物层生物量显著高于草本层,与细根没有差别。

表 2 3 个生态系统不同组分之间生物量分布(括号内为标准误 S. E.)

Table 2 Distribution patterns of components' biomass among three ecosystems(means $\pm$ S. E. in parentheses)

植被类型 Vegetation types	地上部分 /(t/hm ²) Biomass above ground	草本层 /(t/hm ²) Herbaceous layer	枯落层 /(t/hm ²) Floor organic matter	0—10cm 土层木本植物细根/(t/hm ²) Total fine root biomass of woody plant		
				全部 Total fine root	活细根 Living fine root	死细根 Dead fine root
灌草丛 Shrub-and-grassland	1.96 ** (0.35)	0.69 * (0.11) A	0.29 ** (0.07) Bb	0.401 ** (0.059) ABa	0.251 * (0.053) B	0.150 ** (0.037) B
灌木林 Shrubland	4.47 ** (0.55)	1.70 (0.32) A	0.49 ** (0.09) Bb	1.037 * (0.198) ABa	0.505 (0.103) B	0.533 (0.204) B
乔木林 Forest	139.58 (14.47)	0.36 ** (0.13) B	2.96 (0.48) Aa	1.927 (0.159) AB	0.735 (0.089) ABb	1.192 (0.070) AB

* * 和 * 分别表示不同系统间 0.01 和 0.05 水平上差异显著,大写和小写字母分别表示系统内部除地上部分生物量之外不同组分之间 0.01 和 0.05 水平上差异显著

3.2 生态系统各组分养分含量与累积量

3.2.1 生态系统各组分养分含量

不同系统相同组分之间的养分含量存在较明显差异(表 3)。灌木林和灌丛草本植物 N 含量显著高于乔木林($P < 0.01$),但乔木林草本层植物和表土 N 含量显著高于灌木林和灌草丛($P < 0.01$);灌木林木本植物 P 含量显著高于乔木林($P < 0.05$),而乔木林表土 P 含量显著高于灌木林和灌草丛($P < 0.01$)。

表 3 3 个生态系统不同组分的养分含量(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 3 Nutrient contents of components among three ecosystems(means $\pm$ S. E.)

养分 Nutrient	植被类型 Vegetation types	木本植物 Trees	草本植物 Herbs	细根 Fine roots	枯落物层 Forest floor	表土(0—10cm) Surface soil
氮/(g/kg) Nitrogen	灌草丛 Shrub-and-grassland	10.71 $\pm$ 0.92B	9.74 ** $\pm$ 0.48B	16.68 $\pm$ 3.39A	12.24 $\pm$ 1.18AB	4.09 ** $\pm$ 0.12
	灌木林 Shrubland	8.63 $\pm$ 1.14b	7.92 ** $\pm$ 0.32b	14.51 $\pm$ 3.86a	12.16 $\pm$ 1.20a	4.12 ** $\pm$ 0.19
	乔木林 Forest stand	3.04 ** $\pm$ 0.27B	15.88 $\pm$ 0.96A	14.83 $\pm$ 2.11A	13.02 $\pm$ 1.63A	5.29 $\pm$ 0.16
磷/(g/kg) Phosphorus	灌草丛 Shrub-and-grassland	1.22 $\pm$ 0.28n. s.	1.71 $\pm$ 0.07n. s.	1.30 $\pm$ 0.24n. s.	1.55 $\pm$ 0.17n. s.	0.195 ** $\pm$ 0.004
	灌木林 Shrubland	1.51 $\pm$ 0.26n. s.	1.56 $\pm$ 0.11n. s.	1.43 $\pm$ 0.21n. s.	1.75 $\pm$ 0.31n. s.	0.185 ** $\pm$ 0.005
	乔木林 Forest	0.78 * $\pm$ 0.08Bb	1.79 $\pm$ 0.07A	1.38 $\pm$ 0.13ABa	1.54 $\pm$ 0.30A	0.284 $\pm$ 0.006

* * 和 * 分别表示不同系统间 0.01 和 0.05 水平上差异显著,大写和小写字母分别表示系统内部除表土之外不同组分之间 0.01 和 0.05 水平上差异显著,n. s. 表示没有差异

系统内不同组分之间的养分含量也存在较明显差异(表 3)。灌草丛细根 N 含量显著高于木本植物和草本植物($P < 0.01$),与枯落物层没有差异;灌木林细根和枯落物层 N 含量显著高于木本植物与草本植物 N 含量($P < 0.05$);而灌木林和灌丛草本植物、草本植物、细根和枯落物层之间 P 含量没有差异。乔木林草本植物、细根和枯落物层 N 含量显著高于木本植物($P < 0.01$),而草本植物($P < 0.01$)、枯落物层($P < 0.01$)和细根($P < 0.05$)的 P 含量显著高于木本植物,细根与草本植物和枯落物层没有差异。细根和枯落物是植物系统返还土壤养分的主要组分,它们的养分含量高低表明生态系统养分循环速率的快慢,由此可见,随着生态系

统进一步退化,木本植物细根对系统养分循环的作用逐渐提高。

3.2.2 生态系统组分养分储量及其分布格局

与乔木林比较,虽然灌草丛土壤中全 N 和有效态 N 储量显著低于乔木林和灌木林,而退化的灌木林土壤中全 N 和有效态 N 储量尚略高于乔木林,但是随着生态系统不断退化,表土层全 P 和有效态储量呈现逐步下降的趋势(表 4)。

表 4 3 个生态系统表土(0—10cm)主要养分(N、P)储量(平均值±标准误)

Table 4 Major nutrients(N and P) in topsoil(0—10cm) in three ecosystems(means ± S. E.)

养分 Nutrients	灌草丛 Shrub-and-grassland	灌木林 Shrubland	乔木林 Forest	df	F	Sig.
全氮 Total nitrogen/(kg/hm ²)	3746.82 ± 110.24b	4304.83 ± 198.29a	4290.00 ± 184.67a	2	4.007	0.021
有效氮 Available nitrogen/(kg/hm ²)	205.95 ± 8.80 B	330.82 ± 11.30A	322.06 ± 11.97A	2	46.653	0.000
全磷 Total phosphorus/(kg/hm ²)	178.78 ± 3.95 B	195.08 ± 5.90B	238.58 ± 12.64A	2	15.777	0.000
有效磷 Available phosphorus/(kg/hm ²)	1.40 ± 0.07C	2.44 ± 0.13B	3.08 ± 0.16A	2	48.671	0.000

由图 1 可见,乔木林中枝干养分储量(N、P)占生态系统地上部分总量的 85% 以上,枯落物层 N 和 P 养分储量大约为草本层的 10 倍。灌木林和灌草丛系统的灌木层占全部地上 N 和 P 总量的 60% 以上,灌木林和灌草丛草本层 N 积累量为枯落物层的 2 倍左右,但灌木林草本层 P 积累量为枯落物的 2.5 倍,而灌草丛草本层 P 储量是枯落物的 3 倍。乔木林枯落物层 N 和 P 积累量显著高于草本层和细根组分的 N 和 P 储量,但在退化严重的灌木林和灌草丛系统中,枯落物层却低于草本层,并与活细根组分接近,可见在退化严重的生态系统中,细根组分对生态系统养分循环具有十分重要的作用。

3.3 生态系统养分循环

在 3 个喀斯特生态系统中,植物对 N 素的生物吸收率相对比 P 素高(N > P),而 P 素的生物返还率比 N 高(P > N)。在退化生态系统中,P 素的生物迁移率和生物分解率远不如 K 素和 N 素。随着生态系统不断退化,P 素的生物迁移率在 5 大元素迁移顺序中逐渐降低,在退化灌草丛生态系统中主要生命元素的生物迁移率和生物分解率顺序是:K > N > Mg > P > Ca(表 5)。在乔木林中,P 素的生物迁移率和生物分解率明显增加,生物迁移率排序为 P > K > N > Ca > Mg,生物分解率顺序 K > N > Mg > P > Ca(表 5)。

N 素在生物迁移和生物返还系数为灌草丛 > 灌木林 > 乔木林,生物吸收和生物分解率为乔木林 > 灌木林 > 灌草丛;而 P 素的生物迁移和生物分解系数为乔木林 > 灌木林 > 灌草丛,但生物吸收为灌木林 > 乔木林 > 灌草丛,生物返还系数为灌木林 > 灌草丛 > 乔木林。

4 讨论

4.1 生物量分布与养分积累

由于干扰而处于不断退化的森林生态系统,其抗干扰或受扰后的恢复能力与系统不同组分对干扰的敏感程度密切相关^[22]。生物组分对干扰比非生物组分如土壤更敏感^[2],草本植物和细根因为寿命短周转快,它们是森林生态系统中最具活性的组分。虽然乔木林细根生物量和地面枯落物现存量显著高于灌木林($P < 0.05$)和灌草丛($P < 0.01$),但乔木林草本层生物量显著低于灌木林($P < 0.01$)和灌草丛($P < 0.05$),而且在退化较严重的灌草丛和灌木林中,细根和枯落物生物量占系统全部生物量的比例显著高于乔木林(表 2)。

乔木林生态系统的地面现存枯落物层养分含量与草本植物和细根没有差异(表 3),但枯落物层 N 和 P 积累量显著高于草本层和细根,可见枯落物层对退化较轻的生态系统养分循环具有重要作用。在灌木林和灌草丛中,草本植物养分含量与现存枯落物和细根没有差别(表 3),但草本层养分积累量却高于枯落物层和细根组分(图 1),细根与枯落物层没有显著差异,可见在退化严重的生态系统中,草本层对系统物质循环和积累具有较重要作用。另外乔木林枯落物层生物量和主要养分(N、P)积累量也高于草本层和细根部分,而灌木林和灌草丛枯落物层生物量和养分积累均低于草本层和接近细根部分;说明随着植被不断退化,植被养分通过地

面凋落物返还土壤的比例具有逐渐降低的趋势,从而导致土壤养分储量的下降。由此说明,灌木林和灌草丛系统内的活性组分所占比重增加,由于养分滞留时间较短,生态系统内部的养分循环利用效率也就较低^[23],而且系统物质流动速率较高即养分流失的风险也越大,因此灌木林和灌草丛系统抗干扰能力较弱^[2],相反乔木林系统具有较强的抗干扰和自我调节能力^[24],系统稳定性较高。

表 5 3 个生态系统生命元素的生物吸收及迁移特征
Table 5 Absorption and migration characteristics of bio-elements in three ecosystems

养分循环系数 ^[21] Nutrient recycling efficiencies	灌草丛 Shrub-and-grassland				
	N	P	K	Ca	Mg
生物吸收系数 Biological absorption ratio/%	522.19	434.30	—	—	—
生物迁移系数 Biological migration ratio/%	194.28	119.58	216.88	87.47	144.38
生物分解系数 Biological decomposition ratio/%	173.58	53.44	570.79	59.31	148.63
生物返还系数 Biological return ratio/%	300.83	812.76	—	—	—
Biological absorption	N > P				
Biological migration	K > N > Mg > P > Ca				
Biological decomposition	K > N > Mg > Ca > P				
Biological return	P > N				
养分循环系数 ^[21] Nutrient recycling efficiencies	灌木林 Shrubland				
	N	P	K	Ca	Mg
生物吸收系数 Biological absorption ratio/%	497.49	573.43	—	—	—
生物迁移系数 Biological migration ratio/%	129.06	119.55	129.45	73.32	77.36
生物分解系数 Biological decomposition ratio/%	175.90	60.98	473.71	95.29	121.90
生物返还系数 Biological return ratio/%	282.83	940.42	—	—	—
Biological absorption	P > N				
Biological migration	K > N > P > Mg > Ca				
Biological decomposition	K > N > Mg > Ca > P				
Biological return	P > N				
养分循环系数 ^[21] Nutrient recycling efficiencies	乔木林 Forest				
	N	P	K	Ca	Mg
生物吸收系数 Biological absorption ratio/%	534.38	528.04	—	—	—
生物迁移系数 Biological migration ratio/%	128.04	151.15	134.42	91.93	91.82
生物分解系数 Biological decomposition ratio/%	219.74	101.52	402.32	45.56	201.88
生物返还系数 Biological return ratio/%	243.19	520.15	—	—	—
Biological absorption	N > P				
Biological migration	P > K > N > Ca > Mg				
Biological decomposition	K > N > Mg > P > Ca				
Biological return	P > N				

注:生物吸收系数 = (鲜叶养分含量/表土养分含量) × 100; 生物迁移系数 = (鲜叶养分含量/落叶养分含量) × 100; 生物分解系数 = (鲜叶养分含量/凋落物层养分含量) × 100; 生物返还系数 = (凋落物层养分含量/表土养分含量) × 100

4.2 生态系统养分循环

氮素和磷素水平是许多陆地生态系统的主要限制因子,提高它们的利用效率是植物适应胁迫环境的一种重要竞争策略^[23]。不同生活型养分含量存在明显差异,例如乔木树种树干 N ($P < 0.01$) 和 P ($P < 0.05$) 含量显著低于灌木树种茎干,而活细根含量与灌木没有显著差异(表 3),但是功能叶片 N、P 含量却明显高于灌木树种(表 5),说明喀斯特山区灌木树种的养分利用效率相对比乔木树种更高^[25]。因为随着生态系统不断退化,土壤有效态养分含量逐渐降低,植物通过提高养分利用效率或者降低养分损失以适应胁迫环境^[26]。另外乔木林优势树种落叶的 N 和 P 含量也显著高于灌木树种(表 5),也表明灌木树种通过降低养分损失对不利环境的一种适应策略。

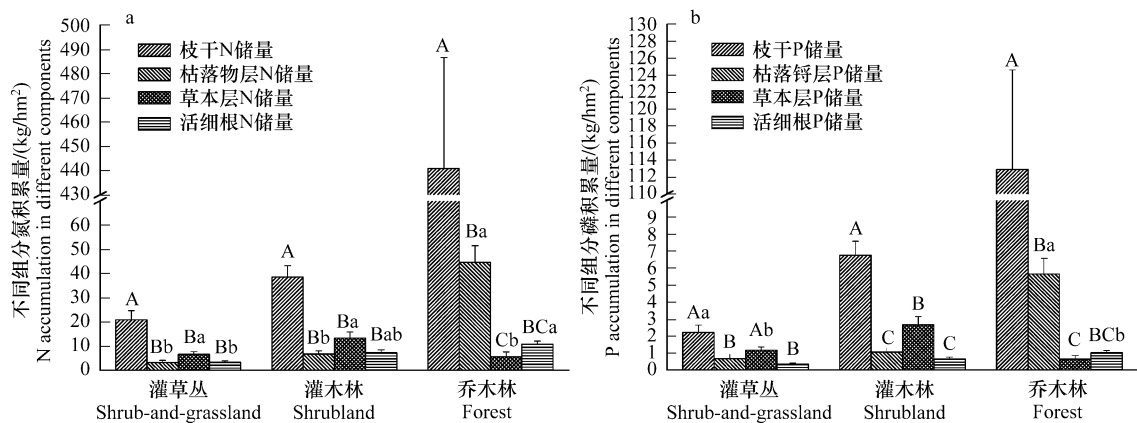


图1 3个生态系统 N 和 P 不同组分养分储量比较

Fig.1 N and P accumulations in different components in three ecosystems

对一个自然生态系统而言,养分分布格局和循环状况是影响生态系统稳定性的重要因素^[4],养分循环是生态系统演变的主要驱动因素,也是土壤养分库时空变化的根本原因。森林生态系统的养分循环效率可以用一系列指标来评价,例如生态系统优势植被层的养分吸收系数、迁移系数、分解系数和返还系数^[20],这些指标与养分流速密切相关^[21]。在3个生态系统之间,乔木林的养分循环效率显著高于灌木林和灌草丛,但乔木林P素的生物利用效率低于灌木林和灌草丛(表5)。虽然乔木林各大元素的生物迁移率顺序为 $P > K > N > Ca > Mg$,与亚热带阔叶林养分迁移($P > N > K > Ca > Mg$)^[27]差不多,但是随着生态系统不断退化,P素的生物迁移率在五大元素迁移顺序中逐渐降低(表5),而且P素的生物吸收率低于N。说明随着生态系统不断退化,P素的限制性作用相对N而言更为突出。由此可见,植被退化^[28]导致土壤养分库功能下降,土壤生物学活性的下降^[29],植物生长的限制性养分(P)的再分配和迁移能力逐渐下降,说明植物在不利环境条件下对限制性养分的利用效率逐渐提高。

5 结论

本研究探讨了喀斯特山区不同退化程度的生态系统各组分生物量结构及其养分分布状况。结果表明,在退化较严重的灌木林和灌草丛中,细根和草本层等活性生物组分的生物量比重显著高于乔木林。由于生物量结构的变化,退化生态系统的活性生物组分的养分累积量的比重也呈类似的变化趋势。虽然灌木树种茎干养分含量显著高于乔木树种树干,但是乔木树种的功能叶片的养分含量高于灌木树种,其他生物组分之间的养分含量没有差异。随着植被类型的变化导致土壤养分储量及其有效态养分含量的变化,而有效态养分资源的改变又促使植被调整碳素和养分元素在各组分间的分配格局及其利用效率,植被与土壤的这种交互作用深远地影响着生态系统内养分资源的分布与循环特征。

References:

- [1] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, Wei L M, Chen Z R. Evaluation on degradation of Karst forest community and human disturbance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 529-532.
- [2] Liu Z W, Wang N J, Li Y S, Lü Y L. Nutritional principle of forest ecosystem stability. *Journal of Northwest Science Technology University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006 34(12): 129-134.
- [3] Bormann J A. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation in Hubbard Brook. *Ecological Monographs*, 1974, 44:255-277.
- [4] Liu Z W, Pan K W. International trends of research on forest nutrients. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(3):183-187.
- [5] Yuan D X. On the karst ecosystem. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 336-338.
- [6] Cao J H, Yuan D X, Zhang C, Jiang Z C. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest china. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1-8.

- [7] Pan G X, Cao J H. Karstification in epikarst zone: the earth surface ecosystem processes taking soil as a medium-Case of the Yaji karst experiment site. Guilin. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(4): 287-296.
- [8] Jiang Z C. Liable content of elements in ecological environments in karst mountains in south china. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(2): 123-128.
- [9] Liu F, Wang S J, Luo H B, Liu Y S, He T B, Long J. Vegetation succession with karst rocky desertification and its impact on water chemistry of runoff. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 26-32.
- [10] Wang S J, Li Y B, Li R L. Karst rocky desertification: formation background, evolution and comprehensive taming. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657-666.
- [11] Piao H C, Liu C Q, Zhu S F, Zhu J M. Variations of C_4 and C_3 plant N:P ratios influenced by nutrient stoichiometry in limestone and sandstone areas of Guizhou. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(5): 552-560.
- [12] Lu X Q, Fang S Z. Studies on the early growth and dynamics of leaf nutrient of eight tree species in the Karst mountain areas of Guizhou Province. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(1): 39-42.
- [13] Yang C, Liu C Q, Song Z L, Liu Z M, Liu H Y. Characteristics of carbon, nitrogen and sulphur of plants and soils in Guizhou karst mountain area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(1): 45-51.
- [14] Wang D L, Zhu S Q, Huang B L. Changes of vegetation features of rocky desertification process in Karst area of Guizhou. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 27(3): 26-30.
- [15] Hu Z L, Pan G X, Li L Q, Du Y X, Wang X Z. Changes in pools and heterogeneity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types in Karst mountainous area of central Guizhou province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 1-9.
- [16] Zhang J T. *Methods in Quantitative Vegetation Ecology*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1995:79-87.
- [17] Wang B S, Yu S X, Peng S L. *Handbook for Plant Ecology Experiment*. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1996:1-996.
- [18] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, Wei L M, Chen Z R. Dynamics of degraded Karst forest in the process of natural restoration. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(1), 1-7.
- [19] Zhu S Q, Wei L M. A preliminary study on biomass components of Karst forest in Maolan of Guizhou Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(4): 358-367.
- [20] Zhang X Q, Wu K H. A review of methods for fine root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 875-883.
- [21] Lu R K. *Soil Agriculture Chemistry and Analysis Methods*. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 2000: 31-40, 80-85.
- [22] Liu Z W, Li Y S. History and status of research of ecosystem stability. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(2): 58-61.
- [23] Su B, Han X G, Huang J H, Qu C M. The nutrient use efficiency (*NUE*) of plants and it's implications on the strategy of plant adaptation to nutrient-stressed environments. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 335-343.
- [24] Turner M G, Romme W H, Gardener R H, O'Neill R V, Kratz T K. A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. *Landscape Ecology*, 1993, 8:213-227.
- [25] Xing X R, Han X G, Chen L Z. Review on research of plant nutrient use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2000, 11(5): 785-790.
- [26] Chapin III F S, Autumn K, Pugnaire F. Evolution of suites of traits in response to environmental stress. *The American Naturalist*, 1993, 142: 578-592.
- [27] Chen L Z, Huang J H, Yan C R. *Nutrient Cycling in Forest Ecosystems in China*. Beijing: Weather Press, 1999.
- [28] Kellogg L E, Bridgham S D. Phosphorus retention and movement across an ombrotrophic minerotrophic peatland gradient. *Biogeochemistry*, 2003, 63: 299-315.
- [29] Zhang P J, Li L Q, Pan G X, Ren J C. Soil quality changes in land degradation as indicated by soil chemical, biochemical and microbiological properties in a karst area of southwest Guizhou, China. *Environmental Geology*, 2006, 51: 609-619.

参考文献:

- [1] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 529-532.
- [2] 刘增文, 王乃江, 李雅素, 吕月玲. 森林生态系统稳定性的养分原理. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 129-134.
- [4] 刘增文, 潘开文. 森林养分研究国际动态. *西北林学院学报*, 2004, 19(3): 183-187.
- [6] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. *地球与环境*, 2004, 32(1): 1-8.
- [7] 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程. *中国岩溶*, 1999, 18(4): 287-296.
- [8] 蒋忠诚. 论南方岩溶山区生态环境的元素有效态. *中国岩溶*, 2000, 19(2): 123-128.
- [9] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 何腾兵, 龙健. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学地影响. *土壤学报*, 2006, 43(1): 26-32.
- [10] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化和治理. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.

- [11] 朴河春,刘丛强,朱书法,朱建明. 贵州石灰岩和砂岩地区 C_4 和 C_3 植物营养元素的化学计量对 N/P 比值波动的影响. 第四纪研究, 2005, 25(5): 552-560.
- [12] 卢晓强,方升佐. 黔中喀斯特山地 8 种树种早期生长和叶片养分动态的研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 39-42.
- [13] 杨成,刘丛强,宋照亮,刘占民,刘厚义. 贵州喀斯特山区植物土壤 C、N、S 的分布特征. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 45-51.
- [14] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 26-30.
- [15] 胡忠良,潘根兴,李恋卿,杜有新,王新洲. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量与空间异质性的变化. 生态学报, 2009, 29(8): 1-9.
- [16] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 科学出版社, 1995: 79-87.
- [17] 王伯荪,余世孝,彭少麟. 植物群落学实验手册. 广州: 广东高等教育出版社, 1996: 1-996.
- [18] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,魏鲁明,陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. 林业科学, 2002, 38(1): 1-7.
- [19] 朱守谦. 魏鲁明. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究. 植物生态学报, 1995, 19(4): 358-367.
- [20] 张小全,吴可红. 树木细根生产与周转研究方法评述. 生态学报, 2000, 20(5): 875-883.
- [21] 鲁如坤. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 刘增文,李雅素. 生态系统稳定性研究的历史与现状. 生态学杂志, 1997, 16(2): 58-61.
- [23] 苏波,韩兴国,黄建辉,渠春梅. 植物的养分利用效率(NUE)及植物对养分胁迫环境的适应对策. 生态学报, 2000, 20(2): 335-343.
- [25] 邢雪荣,韩兴国,陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述. 应用生态学报, 2000, 11(5): 785-790.
- [27] 陈灵芝,黄建华,严昌荣. 中国森林生态系统养分循环. 北京: 气象出版社, 1999.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 23 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 23 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元