

DOI: 10.5846/stxb201810072159

陶慧敏,孙宁晓,温家豪,Umar Muhammad,袁俊,杜红梅,刘春江.滇南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素化学计量特征.生态学报,2019,39(24):9119-9130.

Tao H M, Sun N X, Wen J H, Umar Muhammad, Yuan J, Du H M, Liu C J. Characteristics of soil stoichiometry in native shrub and plantation communities in karst regions of Yunnan province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9119-9130.

滇南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素化学计量特征

陶慧敏^{1,2}, 孙宁晓^{1,2}, 温家豪^{1,2}, Umar Muhammad^{1,2}, 袁俊^{1,2}, 杜红梅³, 刘春江^{1,2,4,*}

1 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240

2 国家林业局上海城市森林生态系统定位观测研究站, 上海 200240

3 上海交通大学设计学院, 上海 200240

4 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240

摘要:在云南喀斯特地区,为提升退化灌木群落的生态系统服务功能,营造了不同树种的人工林分。这些人工林分如何影响土壤化学性质还未得到充分认识。以云南泸西县灌木群落及三种常见人工林(云南松(*Pinus yunnanensis*)、赤杨(*Alnus japonica*)和侧柏(*Platycladus orientalis*))土壤为研究对象探讨喀斯特地区在人工林建造后土壤的 13 种元素含量、可利用性含量和化学计量学特征变异格局,为喀斯特石漠化治理提供理论依据。结果表明,1)基于判别分析,四种群落土壤化学计量特征可以显著区分。土壤 Fe、P、K、Mn 含量及交换性 Ca、交换性 Mg 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对区分四种群落土壤贡献最大。2)四种群落之间相比,侧柏林土壤 C、N、S、Na 含量和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量均低于其他三种群落,土壤肥力较低;赤杨林铵态氮含量最高;云南松林有效 Fe、有效 Cu 含量最高。而且,四个群落土壤含量 C/N、C/K 比值存在显著差异性。3)根据四种群落 13 种土壤元素和 pH 值相关性分析,35 种元素具有显著相关性,占有元素对数的 38.5%,说明该地土壤元素积累的相互依赖性。与灌木群落相比,人工林土壤元素含量和可利用性含量相关性比例均更高。这些研究结果对今后基于适地适树人工林营造、生态系统服务功能提升和经营利用,均具有重要指导意义。

关键词:喀斯特;土壤营养含量;灌木群落;人工林;化学计量特征

Characteristics of soil stoichiometry in native shrub and plantation communities in karst regions of Yunnan province

TAO Huimin^{1,2}, SUN Ningxiao^{1,2}, WEN Jiahao^{1,2}, Umar Muhammad^{1,2}, YUAN Jun^{1,2}, DU Hongmei³, LIU Chunjiang^{1,2,4,*}

1 School of Agriculture and Biology and Research Centre for Low-Carbon Agriculture, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Shanghai Urban Forest Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China

3 School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4 Key Laboratory of Urban Agriculture, Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China

Abstract: The natural forest vegetation degraded to shrub-dominated plant communities in karst areas of Yunnan province, due to the geological conditions and long-term human disturbance. Plantation stands of different tree species have been established to raise ecosystem services across Yunnan province, such the karst shrub areas, during the last three decades. In this context, the elemental compositions of original soils could be influenced to a certain extent. In this study, we measured

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502501)

收稿日期:2018-10-07; 网络出版日期:2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chjliu@sjtu.edu.cn

the total and available element concentrations of 13 elements (C, N, S, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Al, Cu, Zn, and Mn), and summarised the stoichiometric traits of soils in the shrub, *Pinus yunnanensis*, *Alnus japonica*, and *Platycladus orientalis* stands in Luxi county, Yunnan province. The results showed that firstly, soil stoichiometric traits of four communities were significantly distinguished based on canonical discriminant analysis. Furthermore, soil total Fe, P, K, Mn concentrations, and available Ca, Mg, and NH_4^+ -N concentrations, contributed to the differences the most. Secondly, cypress stands showed lower total C, N, S, Na and NO_3^- -N concentrations compared with the other three communities, suggesting that the soil fertility was reduced. The soil NH_4^+ -N concentration was higher in alder stands compared with the other communities; the soil available Fe and Cu concentrations were highest in the Yunnan pine stand. Furthermore, there were also significant differences of C/N and C/K ratios among the four stands. Thirdly, based on a correlation analysis of the 13 elements and the pH value, 35 pair-elements showed a significant correlation, accounting for 38.5% of all elements, suggesting that there was strong inter-dependence accumulation of soil elements in these karst areas. Compared with the shrub community, the significant correlations between the total elements and available elements in plantation stands were higher. Our results have important implications for plantation establishment and management to increase ecosystem services in such karst areas.

Key Words: karst; soil nutrients; shrub community; plantations; stoichiometry

生态化学计量学综合生物学、化学和物理学的基本原理,利用生态过程中多重化学元素的平衡关系,为研究碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素在生态系统过程中的耦合关系提供了一种综合方法^[1]。同时,土壤元素含量和化学计量学特征也为评估植物群落更替对土壤生态系统功能影响提供了一种重要的评估依据。在生态系统中,土壤和植物营养元素状态互相影响,植物根系和叶片对土壤营养元素变化最为敏感^[2-6]。随着植物群落的更替,土壤元素含量和化学计量学特点会发生明显变化,但是,土壤性质变化方向和程度取决于土壤类型、植物种类构成和生长状况^[8-9]。对于人工林而言,土壤性质的变化还受到林龄、人工经营方式和干扰强度的影响。另外,在以前生态化学计量学文献中,已有大量关于植物及土壤 C、N、P 元素和化学计量学的研究,对其他营养元素(包括微量元素)和它们的有效态含量方面研究较少^[3,5-7]。

云南喀斯特地区是我国西南部生态脆弱地区,多次的地质变化和人为活动形成了喀斯特石漠化现象。喀斯特石漠化地区地表土层流失殆尽、基岩大面积裸露,呈现出一种缺土少水无林、类似于荒漠化的景观现象与过程^[10-11]。在我国西南部喀斯特地区,与其他亚热带地区不同,该地的土壤一般具有磷元素缺乏和钙镁富集的特性^[12-13]。已有研究表明,人工林分会明显改变天然群落的土壤性质。例如,谭秋锦等测定了贵州峡谷型喀斯特地区不同群落类型土壤肥力(有机碳、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾),表明土壤肥力状况次生林为最高,其他群落依次为人工林>水田>旱地>灌丛>草地^[14]。对喀斯特地区不同人工林土壤微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Co 等)的有效性进行评估表明,刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)>桤木林(*Alnus cremastogyne*)>杜仲林(*Eucommia ulmoides*)>冰脆李林(*Prunus salicina*)>滇柏林(*Cupressus duclouxiana*)^[15]。

泸西县位于中国云南省东南部,属于喀斯特断陷盆地地区。为了促进森林植被恢复,以期达到生态治理的作用,在退化后的灌木群落地区,营造了大面积的人工林。随着人工林分营造和生长,植物群落组成、土壤营养元素动态(吸收和归还量)、土壤水分状况和微生物种群等都会显著改变,从而强烈影响土壤元素组成和化学计量特征^[9]。相对于灌木群落而言,人工林树木生产力高、生物量营养元素积累量大、对水分循环影响大,对土壤营养吸收、积累、储存和再分配会发生更大作用^[16]。对不同类型人工林对比原生灌木的土壤化学计量学研究,有利于了解人工干扰后植物演替对土壤的影响^[17-18],对未来喀斯特石漠化治理提供理论依据。

在本项研究中,我们选取了三种当地典型适生树种人工林,云南松林(*Pinus yunnanensis*)、赤杨林(*Alnus japonica*)和侧柏林(*Platycladus orientalis*)作为研究对象。三种人工林中,赤杨作为一种非豆科固氮型树种,通过自身固氮作用会显著反馈土壤氮动态。曾有研究表明,赤杨林能增加土壤中有效 P,但不能改变植物受土壤 P 限制的特点^[19];土壤 P 含量的不足较其他元素含量更能限制赤杨林的生长,当土壤 P 含量低于

12mg/kg、落叶 P 含量低于 2mg/g,则赤杨生长受到了 P 的限制^[20]。而针叶树种的云南松和侧柏林分,在生长、营养元素需求和归还、对土壤性质影响等方面,会与作为阔叶树林分的赤杨林分不同,形成具有差异性的森林生态系统。综上所述,我们提出以下科学问题:1)与原有灌木群落相比,人工林群落土壤元素含量和化学计量特性会有哪些改变?2)与灌木群落和其他人工林树种相比,作为一种非豆科固氮树种赤杨能否提高林分土壤 N 含量,进而引发与 N 元素有关的土壤其他元素含量变化?

1 研究区域概况

本研究位于云南省泸西县三塘乡,东经 103°48′—104°51′,北纬 24°30′—24°31′之间(图 1)。该区域属于亚热带季风型气候,年均气温 15.2℃,极端最高气温 34.1℃,最低气温 -7℃,年均日照 2122h,年均降雨量 979mm,无霜期 272.7d。研究区域土壤类型属碳酸盐黄壤,地下水以泉群形式出水,出水口两处,土壤受侵蚀严重。该地原有天然森林植被被破坏后,主要植被为灌丛及次生植被石山灌木林^[21]。在近 20 年,营造了大量人工林,林分树种包括云南松林、赤杨林、侧柏林等。

根据立地条件和人工林分布状况,本研究选取泸西县喀斯特地区次生灌木群落以及三个典型人工林分(云南松林、赤杨林和侧柏林)作为研究对象。每个样地设立 3 个 20m×20m 的样方,各样方相互独立。在林分样地,测量各个样方林木的胸径、树高,并计算各林分密度(表 1)。

经对灌木群落和三种人工林的优势物种调查,原有灌木群落常见灌木主要有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、青刺尖(*Prinsepia utilis*)、薄叶鼠李(*Rhamnus davurica*)、川滇金丝桃(*Hypericum forrestii*),常见草本主要有五月艾(*Artemisia indices*)、密毛蕨(*Pteridium revolutum*)和白茅(*Imperata cylindrica*)等。和原有灌木群落相比,人工林群落植物组成具有较大差异。其中,赤杨林与灌木群落共有植物最多(7 种),分别是青刺尖、五月艾、西南委陵菜(*Potentilla fulgens*)、白茅、薄叶鼠李、密毛蕨和蛇莓(*Duchesnea indica*),此外还有酢酱草(*Oxalis corniculata*)、大车前(*Plantago major*);云南松林有 3 种,分别是薄叶鼠李、火棘和尼泊尔老鹳草(*Geranium nepalense*),此外还有紫茎泽兰(*Eupatorium adenophora*)、大车前等;侧柏林相同物种 3 种,分别是白茅、火棘和五月艾,此外还有紫茎泽兰、井栏边草(*Pteris multifida*)和马桑(*Coriaria nepalensis*)。四种群落中无重复出现的物种。

2 研究方法

2.1 样品采集

2017 年 8 月 24 日,在灌木群落和各个个人工林内,沿着等高线方向,采用 S 形法采集土壤,每隔 10 m 选择一个代表性样点(例如,错开岩石裸露地点、离开树木 1 m 远、相对平缓等),在样点 1 m 范围内采集 3—5 个深度 0—10cm 土壤,混合形成一个土壤样品。取土样时,铲去地表的植被或覆盖物,去除样品中的石砾和动植物,并装入自封袋中待土壤理化性质进行测定。本次研究在每个样地内在选择 7 个在 0—10cm 的土壤样品,共采集 28 个样品。

2.2 土壤元素含量和 pH 值测定

土壤样品一部分放置烘箱经 105℃ 杀青 15 min,再 60℃ 烘干 48 h;另一部分置于室外自然烘干 2 个月至恒重。将所有样品机器研磨呈粉末状。土壤样品过 10 目筛用于土壤可利用性养分和土壤 pH 值的测定;过 60 目筛用于土壤元素全量的测定。

(1)土壤 pH 值:选取置于室外自然烘干 2 个月至恒重过筛后的土壤样品,以 1:5 土壤和水溶液处理,用 pH 计(PHS-3C)测定^[22]。

(2)土壤可利用性含量:硝态氮和铵态氮用 2 mol/L 氯化钾震荡提取 2 h 后,用法国 Smartchem 全自动间断化学分析仪测定;其他元素可利用性含量提取方法:交换性钾钙镁用 1mol/L 乙酸铵(pH=7.0)振荡 30 min 后提取(水:土=10:1),有效磷用 0.025mol/L HCl-0.03 mol/L NH₄F 振荡 30 min 后提取(水:土=10:1),有效态

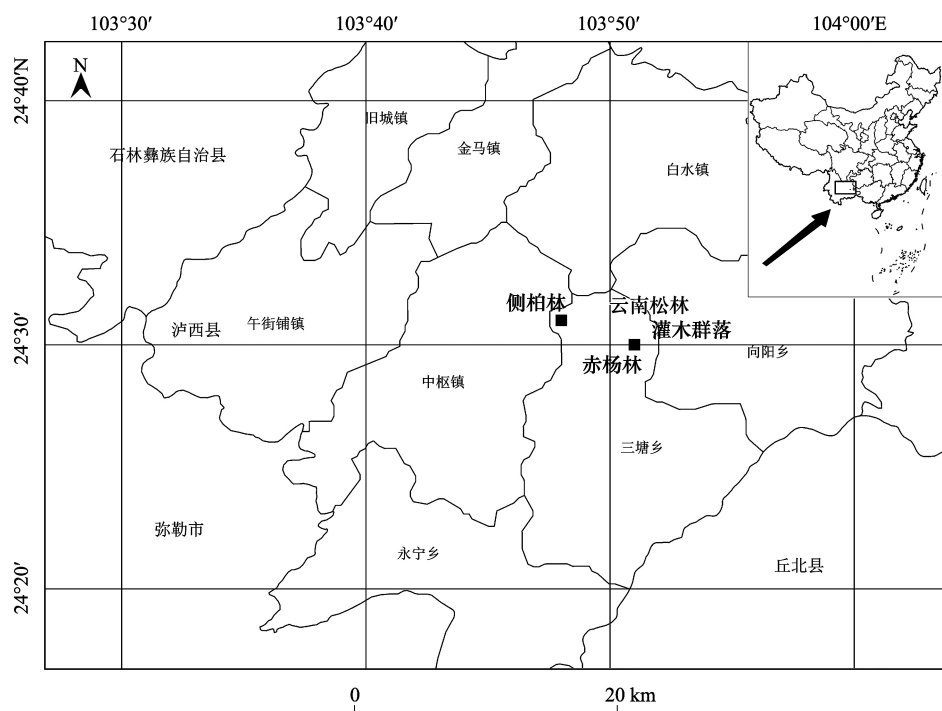


图1 研究区样地信息图

Fig.1 Locations of sampling sites

微量元素及重金属含量(Na、Fe、Cu、Mn 和 Zn)用 0.1mol/L HCl 浸提(水:土=5:1),振荡 90 min^[23]。提取过滤后,用美国热电公司 Iris Advantage 1000 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定(包括 P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Cu、Mn 和 Zn 可利用性含量)。

(3)土壤全量:运用美国 Perkin Elmer 公司 PE2400 II 型元素分析仪(CHNS/O Analyzer)测定土壤中 C、N、S 全量。运用美国热电公司的 Iris Advantage 1000 型电感耦合等离子体发射光谱仪测定 P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Al、Cu、Mn 和 Zn 全量。

2.3 数据处理

运用方差分析(ANOVA)比较四个群落土壤化学计量特征差异;运用多重比较(Duncan test)检验群落间元素含量差异是否显著。为了判断土壤化学计量特征在四个群落间的差异大小,以及哪些元素对区分群落差异性贡献更大,运用典型判别分析(Canonical discriminant analysis, CDA)提取判别方程,提取前两个方程绘制双坐标,并分析各个元素的贡献率。运用皮尔森相关系数分析土壤全量元素之间、可利用性含量间及全量与可利用含量的相关性。用于判别分析和相关性分析的数据均 Log 转化。

方差分析、典型判别分析和相关性分析运用 IBM SPSS Statistics 19 进行分析;直方图运用 Origin pro 9.0 进行绘制;相关分析表达图运用 Adobe Photoshop CS6 进行绘制。

3 结果与分析

3.1 不同群落土壤元素含量

3.1.1 不同群落土壤元素全量特征

根据 13 个元素全量及土壤 pH 进行判别分析,四个群落土壤元素全量具有显著差异性(表 2)。前两个判别方程共解释 89.2% 的差异。其中, N、P 和 Fe 对区分侧柏林和其他三种群落有最大的贡献, K、Cu、Mn 对区分赤杨林及其他三种群落具有最大的贡献。灌木群落和云南松林的土壤元素组成具有相似性。

表 1 云南泸西喀斯特研究区域地理位置及人工林林木生长状况

Table 1 Geographical location of study sites and growth status of plantations in karst regions of Luxi, Yunnan province

样地类型 Stands type	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Altitude/m	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	密度 Density/(stem/hm ²)
灌木群落 Shrub community	24°24'14"N 103°48'55"E	2134	—	—	—
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> plantation	24°24'18"N 103°48'54"E	2143	5.28±0.17	9.87±0.12	5033
赤杨林 <i>Alnus japonica</i> plantation	24°24'12"N 103°48'57"E	2136	3.44±0.15	6.98±0.14	2400
侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i> plantation	24°25'55"N 103°46'27"E	2128	6.31±0.17	15.50±0.05	2500

表 2 土壤元素全量判别分析方程的显著性

Table 2 Wilks' Lambda of canonical discriminant analyses for soil total elements

函数检验 Test of Function	Wilks' Lambda	卡方 Chi-square	df	Sig.
1 到 3 1 through 3	0	145.421	42	0
2 到 3 2 through 3	0.011	80.714	26	0
3	0.148	34.408	12	0.001

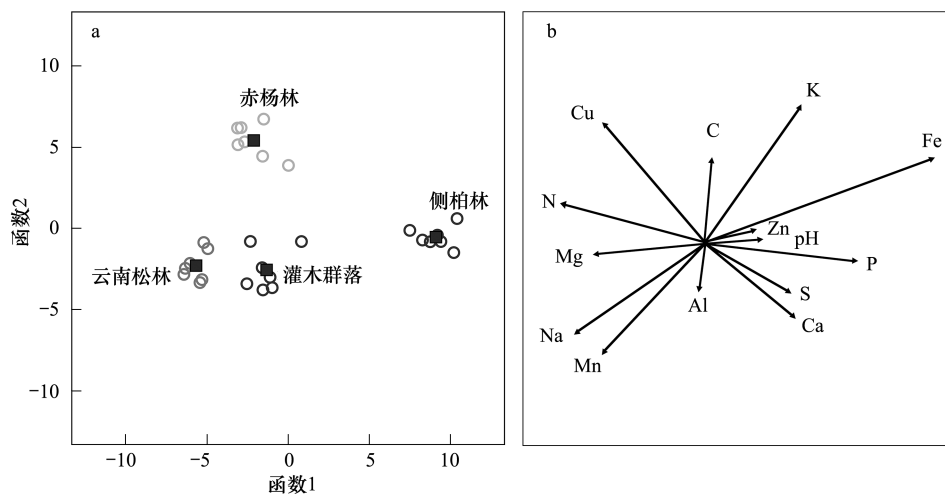


图 2 不同群落土壤元素全量判别分析

Fig.2 Canonical discriminant analysis of soil total elements in different communities

从基于土壤元素全量的判别分析中提取函数 1 和函数 2;a 图展示了四个群落的判别模型效果,b 图带元素变量的箭头长度代表其规范系数,代表其判别不同群落的贡献大小

表 3 显示了四个群落土壤各可利用性养分含量的对比差异性。四个群落样地土壤元素全量具有显著差异($P<0.05$)的有:C、N、S、K、Mg、Na、Fe、Al 和 Mn。与灌木群落相比,赤杨林土壤具有显著更高的 K 含量,显著更低的 Mn 和 Al 含量;侧柏林土壤具有显著更高的 pH 值,显著更低的 C、N、S、Na、Mn 含量。三种人工林相比,侧柏林土壤 C、N、S、Na、Mn 含量最低,赤杨林土壤 K 含量最高;侧柏林土壤 Fe 显著高于赤杨林,云南松林土壤 Al 显著高于赤杨林。

3.1.2 不同群落土壤元素可利用性含量特征

CDA 判别分析表明,四个群落土壤元素可利用含量具有显著差异性(表 4)。第一个判别方程解释了 89.4% 的差异性。土壤交换性钙和交换性镁、铵态氮对区分四个群落土壤具有最大的贡献(图 3)。

表 3 不同群落土壤 pH 值和全量含量/(mg/g)

Table 3 The pH value and total element contents of soils in different communities

因子 Parameters	灌木群落 Shrub community	人工林 Plantations		
		云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	赤杨 <i>Alnus japonica</i>	侧柏 <i>Platycladus orientali</i>
pH	6.54±0.06b	6.57±0.01b	6.39±0.13b	7.08±0.07a
TC	38.81±4.13a	50.23±5.28a	41.26±4.41a	23.61±0.98b
TN	3.71±0.37a	4.54±0.10a	4.02±0.42a	1.90±0.72b
TP	0.50±0.08a	0.51±0.08a	0.57±0.30a	0.36±0.10a
TS	0.90±0.09a	0.90±0.03a	0.81±0.09ab	0.77±0.04b
TK	5.32±0.64b	3.64±0.21b	17.17±4.03a	8.32±1.84b
TCa	3.09±0.14a	3.12±0.26a	3.40±0.72a	3.68±0.75a
TMg	2.86±0.12a	3.30±0.18a	4.99±1.44a	3.48±0.90a
TNa	0.58±0.04a	0.56±0.03a	0.60±0.03a	0.38±0.06b
TFe	76.23±3.34ab	66.36±2.41ab	51.81±5.18b	81.98±13.23a
TAl	79.71±2.40a	82.59±1.34a	65.40±5.58b	70.91±6.21ab
TCu	0.17±0.02a	0.17±0.02a	0.24±0.06a	0.15±0.03a
TZn	0.20±0.01a	0.17±0.01a	0.19±0.03a	0.15±0.03a
TMn	0.94±0.06a	0.90±0.03a	0.46±0.11b	0.47±0.08b

表中 T 开头代表该元素的全量;不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著

表 4 土壤可利用性养分判别分析方程的显著性

Table 4 Wilks' Lambda of canonical discriminant analyses for soil available elements

函数检验 Test of Function	Wilks' Lambda	卡方 Chi-square	df	Sig.
1 到 3 1 through 3	0.001	136.166	36	0
2 到 3 2 through 3	0.047	57.907	22	0
3	0.231	27.846	10	0.002

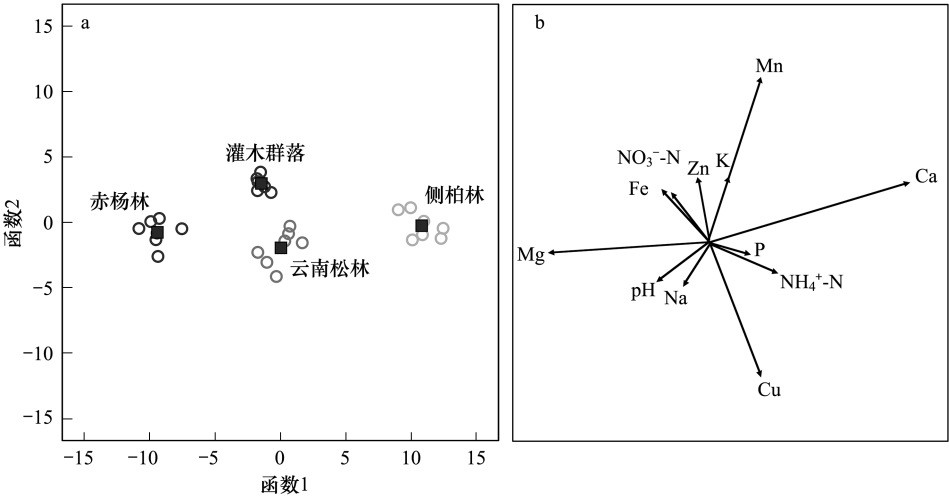


图 3 不同群落土壤可利用性养分判别分析图

Fig.3 Canonical discriminant analysis of soil available elements in different communities

从基于土壤元素可利用性含量的判别分析中提取函数 1 和函数 2;a 图展示了四个群落的判别模型效果,b 图带元素变量的箭头长度代表其规范系数,代表其判别不同群落的贡献大小

表 5 显示了四个群落土壤各可利用性养分含量的对比差异性。四个群落样地土壤元素可利用性含量具

有显著差异 ($P<0.05$) 元素有铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn 和 Mn。其中,与灌木群落相比,可利用性养分中,云南松林土壤具有更高的有效 Fe、有效 Cu 和有效 Zn 含量,更低的交换性 Mg 含量;赤杨林土壤更高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,更低的交换性 Mg 含量;侧柏林土壤具有更低的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和交换性 Ca 含量。

表 5 不同群落土壤 pH 值和可利用性养分含量/(mg/kg)

Table 5 The pH value and soil available element contents in different communities

因子 Parameters	灌木群落 Shrub community	人工林 Plantations		
		云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	赤杨 <i>Alnus japonica</i>	侧柏 <i>Platycladus orientali</i>
pH	6.54±0.06b	6.57±0.01b	6.39±0.13b	7.08±0.07a
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	4.54±0.63b	6.78±0.49ab	7.84±0.87a	4.35±0.28b
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	4.06±1.12a	3.51±0.65a	2.31±0.79ab	1.07±0.13b
AP	5.91±0.91a	6.59±0.38a	7.95±0.43a	6.88±0.32a
AK	160.44±21.37ab	86.15±10.73b	197.14±21.73a	123.79±28ab
ACa	2316.86±211.36a	2130.14±176.41ab	2019.00±144.74ab	1589.43±194.95b
AMg	318.06±29.63a	238.79±18.33b	136.12±10.54c	336.01±32.22a
AMn	150.07±9.93a	65.36±6.85c	77.41±10.02c	114.51±12.67b
ANa	8.17±0.40a	14.66±5.41a	9.94±2.61a	8.43±2.14a
AF _e	8.58±1.32b	34.65±8.19a	5.91±0.97b	10.84±3.76b
ACu	1.43±0.16b	3.65±0.53a	1.81±0.23b	2.07±0.56b
AZn	4.55±0.23b	6.78±0.59a	4.57±0.46b	5.71±1.46ab

表中 A 开头代表该元素的有效态;不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著

3.2 不同群落土壤化学计量学特征

元素含量比值能揭示元素之间的协同或者拮抗关系。如表 6 所示,不同群落土壤 C/N、C/K 比值之间具有显著差异性。

表 6 不同群落土壤化学计量学特征

Table 6 The soil element ratios in different communities

比值 Ratios	灌木群落 Shrub community	人工林 Plantations		
		云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	赤杨 <i>Alnus japonica</i>	侧柏 <i>Platycladus orientali</i>
C/N	10.42±0.12bc	11.05±0.07b	10.26±0.16c	12.44±0.33a
C/P	84.33±8.42a	131.82±34.91a	82.69±9.88a	155.87±34.85a
N/P	8.09±0.80a	11.93±3.17a	8.12±1.04a	12.75±7.04a
C/K	7.99±1.31b	14.08±0.87a	2.64±0.49c	4.35±1.29bc
N/K	8.09±0.80a	11.93±3.17a	8.12±1.04a	12.75±7.04a
P/K	0.10±0.02a	0.14±0.02a	0.04±0.01a	0.08±0.04a
Ca/Mg	1.08±0.04a	0.94±0.04a	0.75±0.12a	3.78±2.77a

不同小写字母表示同一元素不同群落之间差异显著

四种群落土壤 C/N 比值范围在 10.26—12.44 之间,由高到低顺序依次为侧柏林>云南松林>灌木群落>赤杨林;C/K 比值范围在 4.35—14.08 之间,由高到低顺序依次为云南松林>灌木群落>侧柏林>赤杨林。四种群落相比,赤杨林分土壤各元素化学计量比值均较低,而侧柏林土壤元素比值(除 C/K 外)均较高。

3.3 土壤元素全量及可利用性含量相关性分析

对四种群落 13 种土壤元素总量以及 pH 进行相关性分析表明,35 对元素具有显著性相关性 ($P<0.05$), 占有元素相对数的 38.5%。其中,灌木群落土壤 9 对元素具有显著性相关性,云南松林土壤 19 对,赤杨林土壤 16 对,侧柏林土壤 21 对(图 4)。在大量元素中,四种群落的 C 和 N 均存在显著的正相关关系。此外,和 N 相关元素中,灌木群落土壤 1 对(N 和 S),赤杨林土壤 3 对(N 和 P、N 和 S、N 和 Cu),侧柏林土壤 1 对(N 和 S)具有显著相关性。

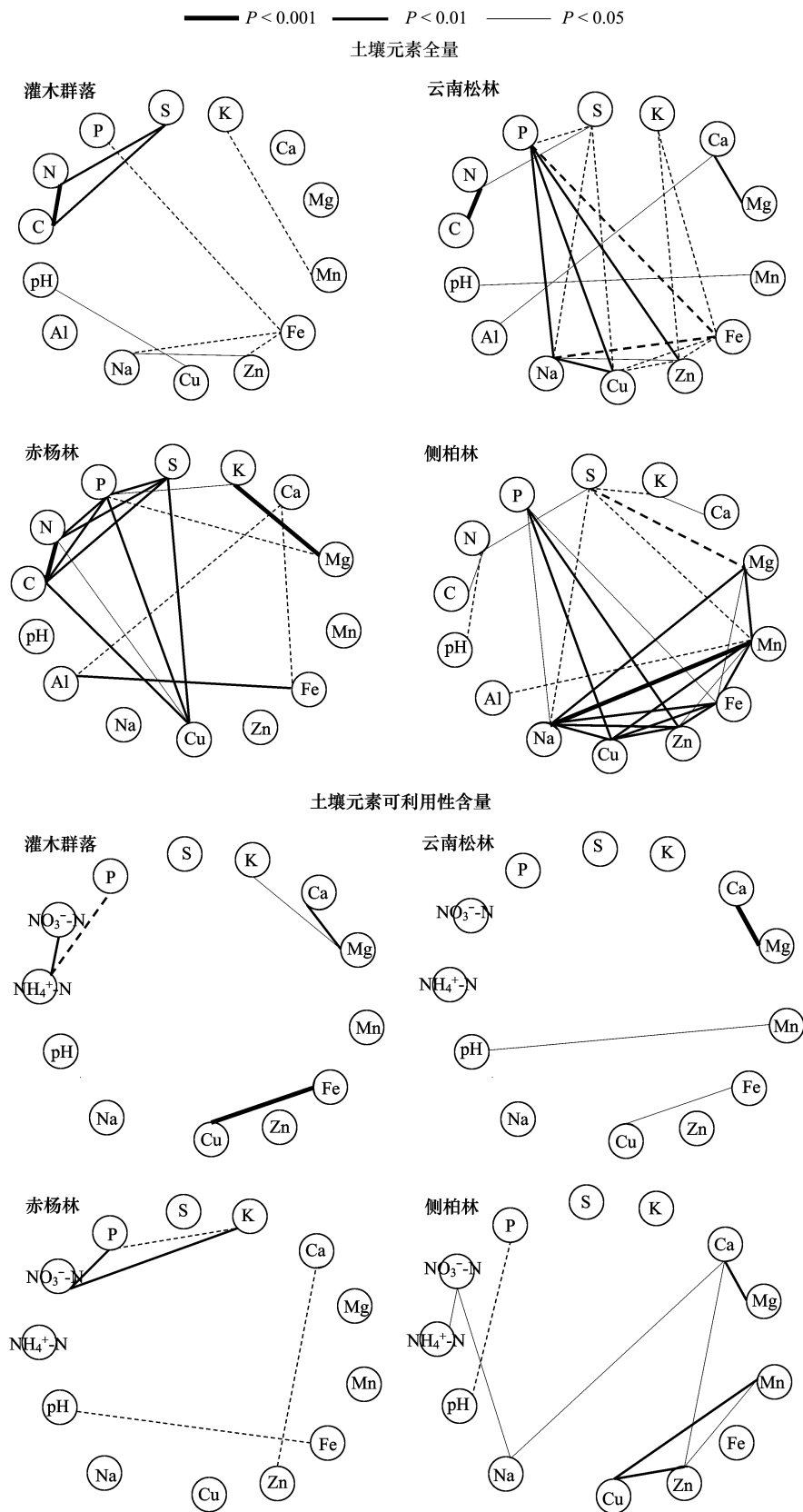


图4 不同群落土壤元素全量间和可利用性含量间的相关性

Fig.4 Correlations between soil total and available element contents in different communities
元素间的连线代表其具有显著相关性,实线代表元素间显著正相关,虚线代表元素间显著负相关

对四种群落 10 种元素可利用性含量和 pH 值相关性分析表明,11 对元素含量具有显著相关性,占有元素对数的 16.67%。其中,灌木群落土壤 5 对元素具有显著相关性,云南松林土壤 3 对,赤杨林土壤 5 对,侧柏林土壤 9 对(图 4)。

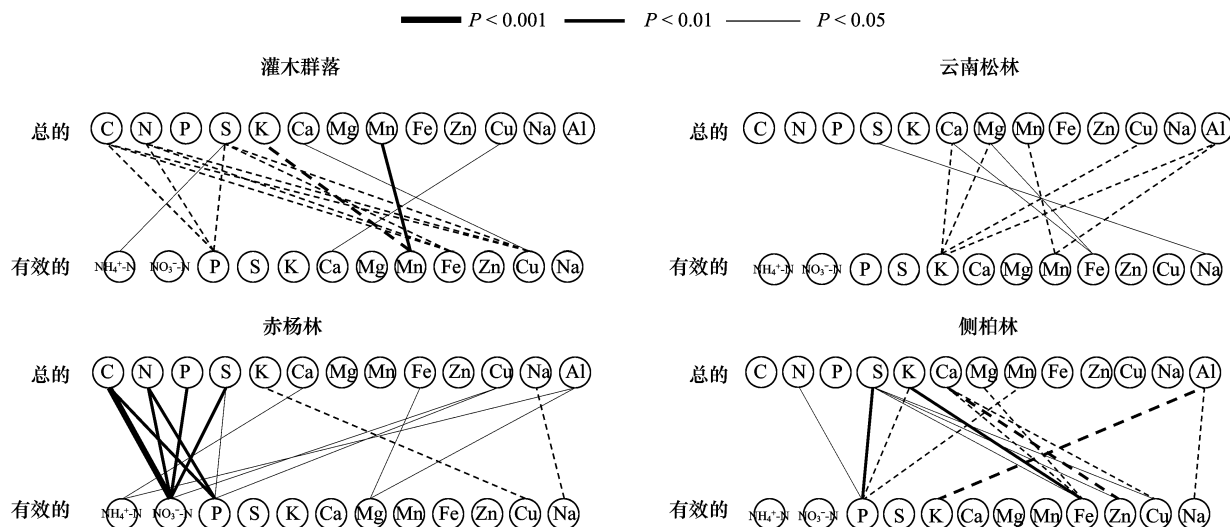


图 5 不同群落土壤元素全量和可利用性含量间的相关性

Fig. 5 Correlations between soil total elements and available elements in different communities

元素间的连线代表其具有显著相关性,实线代表显著正相关,虚线代表显著负相关

对四种群落 13 种元素全量和 11 种元素可利用性含量相关性分析表明(图 5),灌木群落土壤 15 对具有显著相关性,云南松林土壤 9 对,赤杨林土壤 19 对,侧柏林土壤 14 对。赤杨林分土壤全 C、N、P、S 与 NO_3^- -N 显著正相关, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 与其他元素正相关性也较其他三种群落更突出。

4 讨论

4.1 云南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤元素全量差异

本研究结果表明,在云南泸西断陷盆地喀斯特山地地区,四种植物群落土壤(0—10cm)全 N 含量在 1.9—4.54mg/g 之间(表 3),远高于全国 0—10cm 土壤的平均水平(1.88mg/g)^[24],但低于广西喀斯特地区土壤全 N 含量(6.40mg/g)^[25]。四种群落土壤全 P 含量在 0.36—0.50 mg/g 之间,远低于全国及全球平均水平(0.78 mg/g, 2.80 mg/g)^[26],这与喀斯特其他地区土壤普遍缺 P 的现象相一致。土壤全 Ca、Mg 含量均在 3—4 mg/g 之间,体现喀斯特地区土壤高 Ca、Mg 的特性。在本次调查的植物群落中,土壤全 K 含量是桂西北喀斯特峰丛洼地地区乔灌丛全 K 含量的两倍^[27],显示滇南断陷盆地喀斯特地区土壤高 K 含量特点。另外,与云南其他喀斯特地区相比,虽然土壤全 N 量高,但 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量低(表 5),即可供植物吸收利用的 N 含量低,另外土壤 Fe 有效性较低^[13]。

通过判别分析可知,对三种人工林林分而言,无论是土壤元素全量还是可利用性含量,云南松林与灌木群落土壤化学性质最为相近(图 1 和图 2)。其中,侧柏林分土壤 C、N、S、Na 全量均显著低于其他三种群落,这说明侧柏林土壤的肥力较低,与张楠阳的研究结果相一致^[16]。

四种群落土壤 C/N、C/K 比值有显著差异,其他化学计量比值无显著差异(表 6)。人工林土壤 C/N 范围在 10.26—12.44 之间,略低于全球森林 0—10cm 土层平均水平 12.40;而灌木群落土壤 C/N 为 10.42,低于全球草地土壤平均水平 11.80^[28]。这意味着云南泸西喀斯特地区的土壤有机矿化能力和有机质分解能力较好。侧柏林土壤 C/N 比值最大,赤杨林 C/N 比值最小,表明侧柏林土壤矿化速率较慢,而赤杨林土壤矿化速率较快。一般来说,N/P 能反映植物元素受限的土壤供应状况^[29]。我们的研究中,四种群落土壤 N/P 虽然在 8—

12.75 之间,远高于全球陆地平均水平 5.9,但土壤 N 的有效性低,N 的利用效率比 P 的利用效率更低。土壤 C/P 能反映土壤微生物对 P 元素的固持潜力^[29]。四种群落土壤 C/P 处于 82.69—155.87 之间,高于全球森林及草地 0—10cm 平均水平(81.9,64.3),但低于广西喀斯特地区平均水平(61.0)^[25],说明与其他喀斯特地区相比,研究区域土壤 P 的利用率较高。

4.2 云南喀斯特地区灌木群落和人工林土壤可利用性养分及 pH 值差异

三种人工林中,仅侧柏林与灌木群落土壤元素全量具有显著差异性;在可利用性养分中,灌木群落和人工林有 9 种元素呈现出显著差异($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、交换性 Ca、交换性 Mg、有效 Mn、有效 Fe、有效 Cu 和有效 Zn)。这些结果说明,人工林对土壤全量影响较小,而对土壤元素可利用性含量形成了较显著的影响,这与胡忠良等人研究结果相一致^[30]。根据判别分析,土壤可利用性养分可将四种群落显著区分,土壤交换性 Ca、交换性 Mg 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对区别四种群落的贡献最大(图 3),意味着人工林与灌木群落之间及人工林之间土壤元素可利用性含量具有差异性,也表明人工林显著改变了土壤元素可利用性。但是,对于单个元素而言,可利用性 P、Na 在四种群落之间均没有显著差异,有效 Mn 在三种人工林中显著低于灌木群落,而其他元素则没有呈现一致性格局(表 5)。

四种群落土壤 pH 值在 6.5—7.5 之间,属于中性土壤,与一般亚热带地区微酸性土壤性质不同,显示了喀斯特地区土壤的典型特点。土壤 pH 值一直是森林生态系统研究中土壤质量评估的重要标准,它关系到后续土壤利用方式的转变和人工林的管理^[31]。我们的研究中,侧柏林分土壤 pH 值显著高于其他三种群落。土壤 pH 是由离子平衡决定的,两者之间的关系已在其他研究中得到证实^[32]。侧柏林对 Ca 具有极强的富集能力^[33],结合土壤 pH 和土壤多种交换性阳离子呈负相关关系的研究结果,侧柏更高的土壤 pH 值可能是由于栽植人工林之后,土壤中的部分阳离子(如交换性 Ca)被人工林所吸收,进而转化为树木的生物量所导致^[34](图 4)。另外,土壤的可利用性元素含量与 pH 值基本呈负相关性,这与安玉亭等人的研究一致^[15]。例如,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 pH 值呈负相关关系,事实上 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的供给会引起土壤的酸化,导致赤杨林土壤偏酸性^[35]。

4.3 土壤化学计量学特征对不同人工林营造的响应及对石漠化治理的指导

结果表明,选取不同树种作为人工林进行建植,土壤化学计量特征会呈现不同程度的反馈。例如,云南松林分土壤的有效 Fe、有效 Cu 含量显著高于其他三种群落,证实了针叶树种下土壤有效 Fe 的储量增加的研究结论^[36]。Fe 是叶绿素的合成不可缺少的成分,在钙质土的半干旱地区植物因缺 Fe 引发的失绿病尤为严重^[37]。结果表明,云南松的栽植能潜在改善研究区域土壤 Fe 有效性低的状况。但由于云南松林下矿物风化率高,对土壤全 Fe 的影响并不明显(表 3)。再者,土壤铵态氮作为灌木和森林中矿物氮的主要组成部分,可以被植物直接吸收利用^[38],通常被认为是未被微生物固定化的部分。在我们的研究中,赤杨林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量更高可能是由于赤杨树种的固氮能力,导致林下土壤矿质 N 含量显著更高^[39]。因此赤杨对于喀斯特地区防止林地 N 素流失具有重要作用。但与我们起初判断相反,赤杨土壤全 N、N/P 与 N/K 并未显著高于其他三种群落,即赤杨仅提高了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,但未能提高土壤中全 N 含量。另外,赤杨林分土壤有效 P 含量与其他群落相比没有显著差异,这与之前赤杨能提高土壤有效 P 含量的结论不同^[19],可能是与土壤 P 元素显著正相关的 N 含量限制的原因。此外,侧柏林土壤肥力显著低于其他三种群落(C、N、S、Na 全量和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量)。

在以往的研究中,土壤质量评估指标大部分围绕土壤有机质、土壤 pH、有效 N、有效 P 和有效 K。也有学者针对不同土地利用方式总结了特定的土壤质量评价标准^[40-41]。基于原灌木群落和人工林土壤全量和可利用性养分判别分析结果,喀斯特地区,土壤 pH 值、土壤全 C、全 N、全 K、全 P、全 S,和土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、交换性 Ca、交换性 Mg 和交换性 Fe 可以纳入喀斯特地区人工林改造土壤质量的评估指标中。

另外,在本次研究中,选择的人工林样地不是根据实验设计而形成,而是在现有立地条件相似的人工林中选取的,林分年龄不是完全一致。根据实地观测和咨询当地林业局技术人员可知,这些人工林分基本上没有经过间伐抚育,密度较大,郁闭度也都较大。我们的调查仅是对现阶段林分与土壤关系总结,这些林分对土壤

的进一步影响需要追踪观测。在应用本论文的结果或与其他研究对比时,这些问题应予关注。

5 结论

在泸西断陷盆地喀斯特地区,灌木群落形成人工林后,土壤元素全量及可利用性含量均呈现出一定的差异。其中土壤 Fe、P、K、Mn 全量,交换性 Ca、交换性 Mg 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对区分四种群落土壤贡献最大。首先,与灌木群落相比,侧柏林分土壤肥力较低(C、N、S、Na 全量和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量),赤杨林和侧柏林土壤具有显著低的 Mn、Al 全量;侧柏林土壤 C/N、云南松林土壤 C/K 更高而赤杨林土壤 C/K 更低。其次,可利用性养分中,相比灌木群落,三种人工林有效 P 和交换性 Na 无差异,而有效 Mn 含量均显著更低,对其他单个元素而言,人工林没有一致的格局。云南松林土壤具有更高的有效 Fe、有效 Cu 和有效 Zn 含量,更低的交换性 Mg 含量;赤杨林土壤更高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,更低的交换性 Mg 含量;侧柏林土壤具有更低的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和交换性 Ca 含量。最后,相较灌木群落,人工林建造后土壤元素相关性比例更高。赤杨林土壤元素全量间相关性、全量和可利用性含量相关性比例均最高,侧柏林土壤元素可利用性含量相关性比例最高。总体而言,人工林分较大程度区别于原有灌木群落土壤养分和 pH 值,并且不同人工林分之间也有较大差异。在今后人工林营造时,应考虑所选树种对土壤改良的影响及其对生态系统服务的影响。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, Schampel J H. Organism size, life history, and N:P stoichiometry: toward a unified view of cellular and ecosystem processes. *BioScience*, 1996, 46(9): 674-684
- [2] Kou L, Chen W W, Jiang L, Dai X Q, Fu X L, Wang H M, Li S G. Simulated nitrogen deposition affects stoichiometry of multiple elements in resource-acquiring plant organs in a seasonally dry subtropical forest. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 611-620.
- [3] Sardans J, Peñuelas J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 1741-1761.
- [4] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 68-78.
- [5] Zhao N, Yu G R, He N P, Wang Q F, Guo D L, Zhang X Y, Wang R L, Xu Z W, Jiao C C, Li N N, Jia Y L. Coordinated pattern of multi-element variability in leaves and roots across Chinese forest biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 359-367.
- [6] Sardans J, Alonso R, Janssens I A, Carnicer J, Vereseglu S, Rillig M C, Fernández - Martínez M, Sanders T G M, Peñuelas J. Foliar and soil concentrations and stoichiometry of nitrogen and phosphorus across European *Pinus sylvestris* forests: relationships with climate, N deposition and tree growth. *Functional Ecology*, 2016, 30(5): 676-689.
- [7] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [8] West D C, Shugart H H, Botkin D B. Forest succession. Concepts and application. *Vegetatio*, 1984, 56(1): 44-44.
- [9] Zhao F Z, Ren C J, Han X H, Yang G H, Wang J, Doughty R. Changes of soil microbial and enzyme activities are linked to soil C, N and P stoichiometry in afforested ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 289-295.
- [10] 苏维词,周济祚. 贵州喀斯特山地的“石漠化”及防治对策. *长江流域资源与环境*, 1995, 4(2): 177-182.
- [11] 肖时珍. 中国南方喀斯特发育特征与世界自然遗产价值研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2007.
- [12] Zhang W, Zhao J, Pan F J, Li D J, Chen H S, Wang K L. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2): 77-91.
- [13] Wen J H, Ji H W, Sun N X, Tao H M, Du B M, Hui D F, Liu C J. Imbalanced plant stoichiometry at contrasting geologic-derived phosphorus sites in subtropics: the role of microelements and plant functional group. *Plant and Soil*, 2018, 430(1/2): 113-125.
- [14] 谭秋锦,宋明清,曾馥平,彭晚霞,杨钙仁,杜虎. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征. *农业现代化研究*, 2014, 35(2): 225-228.
- [15] 安玉亭,薛建辉,吴永波,胡浩. 喀斯特山地不同类型人工林土壤微量元素含量与有效性特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(3): 65-70.
- [16] 张楠阳. 黄土高原不同人工生态林对土壤营养元素影响的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [17] 龙健,邓启琼,江新荣,刘方. 西南喀斯特地区退耕还林(草)模式对土壤肥力质量演变的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1279-1284.

- [18] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报, 2005, 25(3): 639-644.
- [19] Giardina C P, Huffman S, Binkley D, Caldwell B A. Alders increase soil phosphorus availability in a Douglas-fir plantation. Canadian Journal of Forest Research, 1995, 25(10): 1652-1657.
- [20] Brown K R, Courtin P J. Phosphorus additions increase the early growth of red alder (*Alnus rubra* Bond.) on Vancouver island. Western Journal of Applied Forestry, 2007, 22(2): 116-123.
- [21] 宋鼎, 刘敏. 泸西县城市绿地植物多样性调查研究. 绿色科技, 2014, (10): 121-123.
- [22] Porter W M, Robson A D, Abbott L K. Field survey of the distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in relation to soil pH. Journal of Applied Ecology, 1987, 24(2): 659-662.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 45-103.
- [24] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [25] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [26] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, Wang S Q, Liu M L, Pan S F, Shi X Z. Pools and distributions of soil phosphorus in China. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(1): GB1020.
- [27] 吴海勇, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 黎星辉, 宋希娟, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化. 水土保持学报, 2008, 22(4): 143-147.
- [28] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [29] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [30] 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 含量和空间异质性. 生态学报, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [31] Brejda J J, Moorman T B, Karlen D L, Dao T H. Identification of regional soil quality factors and indicators I. central and southern high plains. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 2115-2124.
- [32] Krishnaswamy J, Richter D D. Properties of advanced weathering-stage soils in tropical forests and pastures. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(1): 244-253.
- [33] 赵勇, 樊巍, 吴明作, 张军, 朱彦峰. 太行山地区侧柏人工林主要养分元素分配及循环特征. 水土保持学报, 2009, 23(2): 143-147, 152-152.
- [34] Yamashita N, Ohta S, Hardjono A. Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: comparison with secondary forest and *Imperata cylindrica* grassland soils in South Sumatra, Indonesia. Forest Ecology and Management, 2008, 254(2): 362-370.
- [35] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. 植物生态学报, 1997, 21(4): 335-341.
- [36] Augusto L, Ranger J, Binkley D, Rothe A. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. Annals of Forest Science, 2002, 59(3): 233-253.
- [37] 易志军, 吴晓芙, 胡曰利. 人工林地土壤质量指标及评价. 林业资源管理, 2002, (4): 31-34.
- [38] Nordin A, Högberg P, Näsholm T. Soil nitrogen form and plant nitrogen uptake along a boreal forest productivity gradient. Oecologia, 2001, 129(1): 125-132.
- [39] Beaupied H, Moiroud A, Domenach A M, Kurdali F, Lensi R. Ratio of fixed and assimilated nitrogen in a black alder (*Alnus glutinosa*) stand. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(7): 1116-1119.
- [40] Bautista-Cruz A, del Castillo R F, Etchevers-Barra J D, del Carmen Gutiérrez-Castorena M, Baez A. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. Forest Ecology and Management, 2012, 277: 74-80.
- [41] Huang Z J, Selvalakshmi S, Vasu D, Liu Q Q, Cheng H, Guo F T, Ma X Q. Identification of indicators for evaluating and monitoring the effects of Chinese fir monoculture plantations on soil quality. Ecological Indicators, 2018, 93: 547-554.