



岑佳宝,武燕,徐艳梅,等. 贵州脆弱生态区三种森林类型土壤碳氮磷含量及储量分布特征[J]. 黑龙江农业科学, 2024(6):57-63.

贵州脆弱生态区三种森林类型土壤 碳氮磷含量及储量分布特征

岑佳宝¹, 武燕^{1,2}, 徐艳梅¹, 宋雪红¹, 刘梅¹, 谢静怡¹, 王浪¹, 张宏程¹

(1. 贵州师范学院生物科学学院, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州省高等学校林火生态与管理重点实验室, 贵州 贵阳 550018)

摘要:为探究不同森林类型的土壤养分贮存能力,以贵州喀斯特脆弱生态区3种森林类型(柳杉针叶林、枫香阔叶林及二者组成的针阔混交林)土壤为研究对象,分析不同森林类型土壤有机碳、全氮、全磷含量及储量的分布特征,并探讨土壤碳、氮、磷含量及储量与叶片、枯落物、腐殖质碳、氮、磷之间的耦合关系。结果表明,(1)针叶林土壤有机碳含量为 $26.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $1.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量为 $0.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;阔叶林土壤有机碳含量为 $22.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $1.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量为 $0.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;针阔混交林土壤有机碳含量为 $30.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量为 $1.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量为 $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。针叶林土壤有机碳储量为 $48.62\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全氮储量为 $2.16\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全磷储量为 $0.81\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;阔叶林土壤有机碳储量为 $48.13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全氮储量为 $2.21\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全磷储量为 $0.84\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;针阔混交林土壤有机碳储量为 $60.43\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全氮储量为 $2.37\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、全磷储量为 $0.80\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。(2)林型变化对土壤有机碳、全磷含量及有机碳储量存在显著影响,针阔混交林有机碳含量及储量均显著高于针叶林和阔叶林,而针叶林全磷含量显著高于阔叶林。(3)林型变化对全氮含量、全氮储量及全磷储量均无显著影响。(4)相关性分析结果表明,叶片、枯落物及腐殖质碳、氮、磷含量与土壤碳、氮、磷含量及储量之间均存在不同程度的相关关系。综上所述,研究区针阔混交林中有有机碳含量及储量具有明显优势,而针叶林中全磷含量具有明显优势,叶片、枯落物及腐殖质养分与土壤养分存在不同程度的相关性。

关键词:森林类型;碳氮磷含量;碳氮磷储量;脆弱生态区

碳(C)、氮(N)、磷(P)元素是森林土壤养分中十分重要的组成部分,也是植物生长发育所必需的营养元素^[1],森林土壤有机碳储量约占全球土壤碳库的73%^[2],是陆地生态系统最大的碳库,其变化会影响温室效应与全球碳平衡。森林土壤固碳能力主要受树种组成、林分类型以及森林经营管理措施等因素的影响^[3]。N与P元素是土壤肥力的重要指标,也是限制植物生长的重要元素,森林生产力受N、P含量和储量变化的影响^[3],其含量的高低与植物的生长速率密切相关^[4]。植物生长发育过程中,经光合作用合成有机物,同时将部分有机物转移到土壤中,并将C、N、P等养分以枯落物的形式逐步归还给土壤^[5];C、N、P等养分在叶片、枯落物、腐殖质和土壤之间的转化与吸收这一循环过程,促进着生态系统的演替与恢复^[6]。因此,探究植物叶片、枯落物和

腐殖质这3个组与土壤的相关关系,对于了解贵州喀斯特脆弱生态区森林生态系统的生长发育及各组分之间养分的循环关系、调节不同森林类型的土壤碳平衡、提高土壤肥力等方面具有重要意义。

西南喀斯特地区是中国非常重要的脆弱生态功能区,贵州省地处该区域的中心,其喀斯特面积占全省土地面积的62%^[7],由于喀斯特地貌水土流失严重、石漠化比例较高、地表土层浅薄、土壤总量少等生态环境问题,脆弱的生态环境已经成为制约西南地区社会经济发展的主要问题^[8]。为了保护喀斯特脆弱生态区,贵州省近年来实施退耕还林工程。柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)是贵州省近年来实施退耕还林工程等各种林业建设工程中的主要造林树种之一。目前,有关贵州喀斯特脆弱生

收稿日期:2024-03-20

基金项目:大学生创新创业训练计划项目(202314223017);贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般282);贵州师范学院校级博士基金项目(2020BS026);贵州省教育厅平台项目([2022]051号)。

第一作者:岑佳宝(2001-),男,本科生,专业方向为生物科学。E-mail:1711469339@qq.com。

通信作者:武燕(1975-),女,博士,副教授,从事土壤生态学研究。E-mail:wuyan200081@163.com。

态区土壤碳氮磷储量形成的路径以及各组分(叶片、枯落物、腐殖质)作用贡献尚未明确,脆弱生态区不同森林类型土壤养分含量及储量空间分布的研究鲜有报道。基于此,本研究选取柳杉针叶林、枫香阔叶林及二者组成的针阔混交林共3种森林类型为对象,研究不同森林类型土壤C、N、P含量及储量的分布特征以及叶片、枯落物及腐殖质养分与土壤养分间的相关性。以期为我国西南喀斯特脆弱生态区森林恢复与可持续经营管理提供更充分的理论依据,为贵州脆弱生态区森林碳氮磷储量估算提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究区位于贵州省贵阳市修文县扎佐林场(26°45'N~27°12'N,106°21'E~106°53'E),林场地处黔中腹地,是贵阳市环城林带的重要组成部分,林区分布于贵州省贵阳市、黔南州所辖4县2区,经营面积1 010.67 hm²,森林覆盖率88.6%^[9]。境内海拔940~1 610 m,平均海拔1 290 m,属于较典型的喀斯特高原区^[10]。气候类型为亚热带季风性湿润气候,年均气温12.8~14.6℃,降雨量

877~1 121 mm,平均日照1 300 h,无霜期261 d^[11]。土壤类型多为酸性或微酸性黄壤土^[12],林场植被类型多为人工植被,树种组成以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、华山松(*Pinus armandii* Franch)和桦(*Betula* L.)为主,其次还有黑松(*Pinus thunbergii* Parl)、檫木(*Sassafras tzumu* Hemsl)、樟树(*Cinnamomum bodinieri* Nees ex Wall)、泡桐(*Paulownia* Sieb, et Zucc)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)和栎(*Quercus fabri* Hance)等^[13],森林类型以针叶林、阔叶林及针阔混交林3种类型为主。

1.2 方 法

1.2.1 样地设置 依据代表性和一致性原则,在贵州省扎佐林场选择海拔、地形、坡向和坡度等条件基本相同的区域作为标准样地,设置相同系列(近似相同林龄、林分密度)的针叶林、阔叶林和针阔混交林3种森林类型样地。不同森林类型选择3块标准样地作为重复,共9块标准样地,样地按20 m×20 m(400 m²)方形设置,调查乔木层树木的林龄、林分密度等。供试样地基本信息见表1。

表1 供试样地基本信息

林型	样地号	林龄	海拔/m	坡度/°	坡向	密度/(株·hm ⁻²)	优势树种
针叶林	I	中龄林	1333	55.0	北	625	柳杉
	II	中龄林	1349	45.0	西北	725	柳杉
	III	中龄林	1323	54.0	北	850	柳杉+马尾松
阔叶林	I	中龄林	1317	53.0	西北	650	枫香
	II	中龄林	1317	48.0	西南	725	枫香
	III	中龄林	1317	60.5	西北	750	枫香
针阔混交林	I	中龄林	1337	58.5	西北	550	柳杉+枫香+栎
	II	中龄林	1339	53.1	西北	475	柳杉+枫香
	III	中龄林	1350	46.0	西北	525	柳杉+枫香

1.2.2 样品采集 野外调查与样品采集于2021年10月进行,通过每木检尺在各样地内挑选3株标准木,使用高枝剪从树冠的3个层次(上、中、下)4个方向采集约500 g生长健康的成熟叶片,混合作为一份样品。之后分别在样地的西南、西北、东北、东南及中部5个方位收集1 m×1 m样方内的全部枯落物及表层腐殖质,分别装袋带回实验室备用;采用“S”型选取5个点分别挖取0~20 cm的土壤剖面,使用环刀采集土壤样品,同一样地的土样混合后带回实验室备用。

1.2.3 样品处理和碳、氮、磷的测定方法 样品处理:叶片、枯落物和腐殖质样品于105℃下杀青2 h后转烘箱80℃烘干至恒重,然后粉碎过

0.25 mm孔径筛,制成待测样品。土壤样品经自然风干后剔除石砾、根系和动物残体等杂物,研磨至95%样品通过0.25 mm孔径筛,装袋标记,并保存备用。

养分含量测定:有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钼锑抗显色-紫外分光光度法测定^[14],每一样品测定4次取平均值。

土壤碳(氮,磷)储量计算公式为:

$$S_{C(N,P)1} = C_1 P_1 T_1 / 10$$

式中, $S_{C(N,P)1}$ 为土壤表层(0~20 cm)的土壤有机碳(全氮、全磷)储量(t·hm⁻²), C_1 为第1层土壤有机碳全碳、全磷的含量(g·kg⁻¹), P_1 为第

1层土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), T_1 为第1层土层厚度(cm)。

1.2.4 数据分析 采用Excel 2019进行数据整理,采用SPSS 22.0进行统计分析,采用Origin 2017软件绘图。利用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同林型之间土壤C、N、P含量及储量的差异,然后用最小显著差数法(LSD)检验差异显著性($P<0.05$)。通过Pearson相关性分析探讨叶片、枯落物和腐殖质C、N、P含量分别与土壤C、N、P含量及储量的相关性。

2 结果与分析

2.1 贵州脆弱生态区森林土壤碳、氮、磷含量及储量特征

由表2可知,贵州脆弱生态区针叶林、阔叶林、

针阔混交林3种林型林地土壤有机碳含量介于 $14.65\sim 36.72\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮含量介于 $0.80\sim 1.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷含量介于 $0.31\sim 0.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。土壤碳、氮、磷平均含量分别为 $26.49, 1.14$ 和 $0.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳储量、全氮储量及全磷储量的平均值分别为 $52.40, 2.24$ 和 $0.81\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

土壤全磷储量的变异系数最小(12.19%),其次是全磷含量(12.37%),土壤全氮含量、全氮储量、土壤有机碳含量的变异系数分别为15.57%、18.64%和24.52%,均属于弱变异($<25\%$)。而有机碳储量变异系数为26.68%,属于中等以上变异,说明在针叶林、阔叶林、针阔混交林3种林型间有机碳储量变化幅度较大。

表2 贵州脆弱生态区森林土壤碳、氮、磷含量及储量

参数	含量/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			储量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		
	有机碳	全氮	全磷	有机碳	全氮	全磷
平均值	26.49	1.14	0.41	52.40	2.24	0.81
标准误	1.08	0.03	0.01	2.33	0.07	0.02
最小值	14.65	0.80	0.31	26.08	1.44	0.63
最大值	36.72	1.47	0.48	73.04	3.13	1.05
变异系数/%	24.52	15.57	12.37	26.68	18.64	12.19

2.2 3种林型土壤碳、氮、磷含量及储量差异分析

2.2.1 碳、氮、磷含量 由图1A可知,针叶林、阔叶林、针阔混交林表层(0~20 cm)土壤有机碳、全氮、全磷含量平均值范围分别为 $22.95\sim 30.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.06\sim 1.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.39\sim 0.44\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;有机碳含量在3种林型之间大小表现为针阔混交林>

针叶林>阔叶林,且针阔混交林有机碳含量显著高于阔叶林,而针叶林与阔叶林、针阔混交林之间无显著差异(图1A);全氮含量在3种林型之间均无显著差异(图1C);全磷含量大小表现为针叶林>针阔混交林>阔叶林,且针叶林和阔叶林之间存在显著差异,而针阔混交林与针叶林、阔叶林之间无显著差异(图1E)。

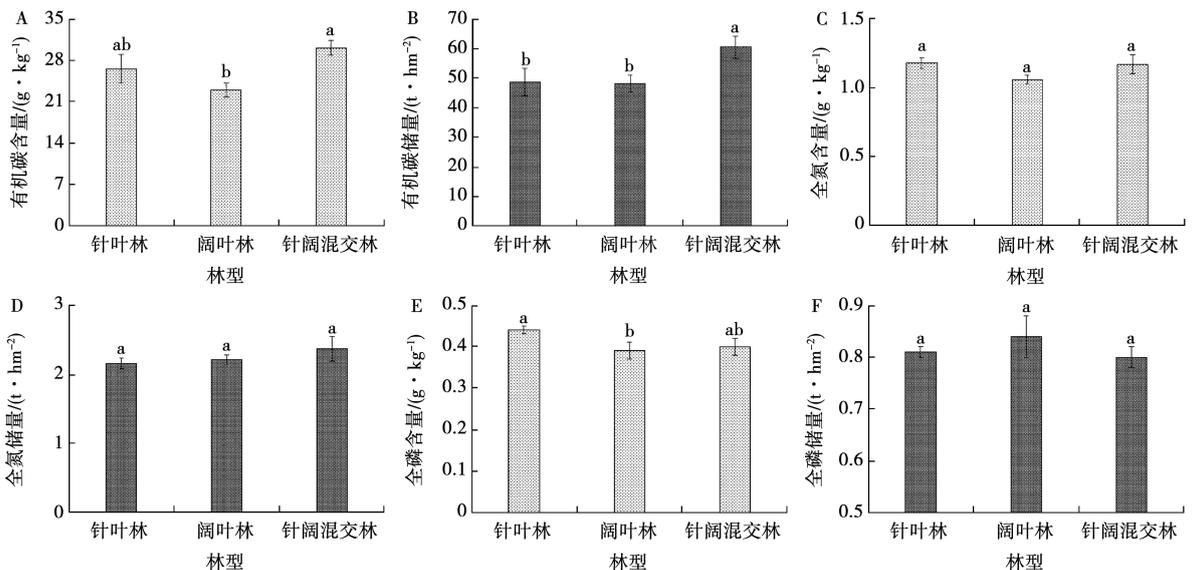


图1 不同林型土壤有机碳、全氮、全磷含量(A、C、E)及储量(B、D、F)特征

注:不同小写字母表示不同林型间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2.2 碳、氮、磷储量 针叶林、阔叶林、针阔混交林表层(0~2 cm)土壤有机碳、全氮、全磷储量平均值范围分别为 48.13~60.43 t·hm⁻²、2.16~2.37 t·hm⁻² 和 0.80~0.84 t·hm⁻²;有机碳储量在 3 种林型之间表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林,且针阔混交林显著高于针叶林和阔叶林,而针叶林与阔叶林之间无显著差异(图 1B);全氮储量在 3 种林型之间表现为针阔混交林>阔叶林>针叶林,但 3 种林型之间均无显著差异(图 1D);全磷储量在 3 种林型之间表现为阔叶林>针叶林>针阔混交林,但 3 种林型之间均无显著差异(图 1F)。

2.3 土壤碳、氮、磷含量及储量与叶片、枯落物、腐殖质碳、氮、磷含量的相关性分析

由表 3 可知,土壤(0~20 cm)有机碳含量与枯落物有机碳含量呈极显著正相关,相关系数为

0.510;与腐殖质全氮含量呈显著负相关,相关系数为-0.402。土壤全氮含量与枯落物全氮含量、叶片全氮含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.445 和 0.549,与腐殖质有机碳含量呈显著正相关,相关系数为 0.399,与腐殖质全氮含量呈极显著负相关,相关系数为-0.491。土壤全磷含量与腐殖质全磷含量呈极显著正相关,相关系数为 0.562,与叶片有机碳含量呈极显著负相关,相关系数为-0.549。土壤有机碳储量与枯落物有机碳含量呈显著正相关,相关系数为 0.415;与叶片全磷含量呈显著负相关,相关系数为-0.332。土壤全氮储量与叶片全氮含量呈显著负相关,相关系数为-0.364,而与其他组分的养分含量均无显著的相关性。土壤全磷储量与叶片有机碳含量呈极显著正相关,相关系数为 0.550;与枯落物全氮含量呈极显著负相关,相关系数为-0.444。

表 3 土壤 C 碳、氮、磷含量及储量与叶片、枯落物、腐殖质碳、氮、磷含量的相关性

项目	腐殖质 有机碳	腐殖质 全氮	腐殖质 全磷	枯落物 有机碳	枯落物 全氮	枯落物 全磷	叶片 有机碳	叶片 全氮	叶片 全磷
土壤有机碳含量	0.187	-0.402*	-0.043	0.510**	-0.218	-0.217	0.029	-0.230	-0.177
土壤全氮含量	0.399*	-0.491**	0.066	0.081	0.445**	0.220	-0.223	0.549**	0.240
土壤全磷含量	0.217	-0.250	0.562**	-0.235	0.301	0.189	-0.549**	0.272	-0.177
土壤有机碳储量	0.069	-0.178	-0.007	0.415*	-0.248	-0.249	0.013	-0.309	-0.332*
土壤全氮储量	-0.233	-0.008	-0.113	0.274	-0.308	-0.038	-0.001	-0.364*	-0.111
土壤全磷储量	-0.269	0.097	0.215	-0.042	-0.444**	-0.153	0.550**	-0.228	-0.098

注:*表示显著相关($\alpha=0.05$),**表示极显著相关($\alpha=0.01$)。

3 讨论

3.1 贵州脆弱生态区土壤碳、氮、磷养分含量及储量特征

C、N、P 元素作为土壤中最重要有机组分,是鉴定土壤肥力的重要指标。本研究中,贵州脆弱生态区表层土壤(0~20 cm)的有机碳、全氮、全磷平均含量分别为 26.49,1.14 和 0.41 g·kg⁻¹,有研究表明,全国森林 0~10 cm 土壤有机碳、全氮、全磷平均含量为 11.2,1.06 和 0.65 g·kg⁻¹[15],本研究有机碳含量高于全国森林土壤,全氮含量与全国森林土壤相近,而全磷含量低于全国森林土壤。与喀斯特区不同退化程度植被群落植物[16]土壤(0~15 cm)相比,有机碳含量接近,而全氮、全磷含量相对较低;但与李明军等[17]对不同林龄杉木人工林 0~10 cm 土壤研究结果(C:22.57 g·kg⁻¹、N:1.33 g·kg⁻¹、P:0.46 g·kg⁻¹)相近;与陕西省、湖南会同、亚热带 4 种森林、桂西

北喀斯特森林等地区(0~10 cm)土壤 C(18.2~19.4 g·kg⁻¹)[18-19]、N(1.20~6.35 g·kg⁻¹)、P(0.41~1.5 g·kg⁻¹)[20-21]相比,土壤 C 含量较高,N、P 含量处于平均水平下限,可见,贵州脆弱生态区土壤 C、N、P 含量呈现高-低-低的元素格局;这可能与喀斯特地貌水土流失严重,养分随水土流失严重,土壤 N、P 存留量少有关。

本研究中,3 种森林生态系统表层土壤平均有机碳、全氮、全磷储量分别为 52.40,2.24 和 0.81 t·hm⁻²,土壤有机碳储量接近陶玉华等[22]对柳州市马尾松、杉木和桉树人工林土壤有机碳储量的研究、与兰斯安等[23]研究的广西北部中龄林杉木林表层土壤(0~10 cm)有机碳储量相近。与我国森林表层土壤平均 C、N 储量为 193.55 t·hm⁻²[24]和 34.64 t·hm⁻²[25]相比,土壤 C、N 储量远低于全国平均水平,主要原因可能是本研究所选的 3 种林型地处黔中喀斯特地区,属于亚热带区,温度水分等条件较好,生产力较高,有利于植被生物

量积累;此外,土壤的呼吸速率较高能够加快枯落物的分解速率,加上植物对土壤C、N养分的大量吸收,造成C、N储量相对较低^[26],同时土壤较高的呼吸速率导致释放到大气中的碳量(CO₂形式)较多,因此土壤碳积累少^[27]。另外,西南喀斯特山区易发生滑坡、泥石流等地质灾害,导致水土流失,造成土壤C、N大量流失。而土壤P储量接近于滇中磨盘山(0.71~2.00 t·hm⁻²)^[28],与相同气候和土壤类型的贵州省凤冈县地区不同林龄马尾松人工林相比(C储量:26.42~38.65 t·hm⁻²、N储量:1.30~2.34 t·hm⁻²、P储量:0.69~0.80 t·hm⁻²),土壤N、P储量接近^[29]。

3.2 3种林型土壤C、N、P含量及储量变化特征

土壤是一个十分重要的碳库,土壤碳储量受土壤特性、森林管理政策、凋落物的输入以及根系周转率的影响^[30]。本研究表明,林型间针阔混交林土壤有机碳含量显著高于阔叶林,这与张亚冰等^[31]对贵州月亮山5种森林类型、张雨鉴等^[32]对滇中亚高山地区5种森林类型的研究结果相似。本研究还表明,针阔混交林土壤有机碳储量显著高于阔叶林和针叶林,可见,土壤有机碳储量受林分类型和森林起源的影响,这与何高迅等^[33]、弓文艳等^[34]研究的结果相似。森林土壤有机碳主要来源于植被地上的凋落物和根系分泌物,不同植被类型会影响森林土壤有机碳的数量、质量及循环^[35],不同树种的凋落物差异也会在一定程度上影响土壤有机碳含量和储量。与针叶林相比,混交林中由于落叶阔叶树种枫香生长快、树冠大、落叶丰富,能为混交林地土壤提供更多的凋落物,凋落物数量增加,分解之后改善了林地土壤的物理特性,加速了养分循环,从而也提高了混交林地土壤的肥力^[36],因此针阔混交林有机碳储量最高。研究表明,针阔混交林能够改善森林植物的生态环境,这种改善有利于加速凋落物分解、缓解土壤酸性状况,加速有机物的分解和养分累积,且能使林地土壤湿润,保水透气性增强^[31];在提高土壤肥力、改善林地养分状况、增加林地物种多样性、提高林分结构的稳定性和生产力等方面均发挥了重要作用^[37]。

P是影响土壤肥力的重要元素,是植物生产力的限制性养分元素,土壤P含量主要受到海拔、经纬度、植被特征和质地等其他因子的影响^[38]。针叶林P含量显著高于阔叶林,何高迅等^[33]对云南松林和次生常绿阔叶林研究发现,云南松林P含量

高于次生常绿阔叶林,这与本研究结果一致;但与李青桦等^[39]的研究结论不相符,这可能是由于不同林型林木种类、林分郁闭度、林龄、树高和胸径等不同其林下调落物的数量、组成成分及分解速率不同,进而影响土壤表层养分含量^[5,40]。加上针叶林成土母质含有较高的铁铝氧化物,固定P能力较强所致^[41]。本研究中土壤P储量在各林分类型间无显著差异,这可能是由于磷元素主要依赖于土壤母质的分解,而土壤母质的自然分解周期较为漫长,影响因素较少,空间变异较小,故土壤各土层的磷含量分布较为均匀^[3]。另外,针、阔叶林的林下调落物量不同,阔叶林更丰富的凋落物量和更快的分解速率加速了凋落物中磷向土壤的输入,但由于凋落物分解产生的有效磷会迅速被植物吸收^[2],因此这个因素对土壤P库产生的影响相对较小。

3.3 贵州脆弱生态区土壤碳氮磷含量及储量与叶片、凋落物、腐殖质碳氮磷的相关关系

土壤养分是植物养分主要来源,影响植物生长^[42],同时受到凋落物、腐殖质中养分归还的影响。叶片、凋落物、腐殖质组分C、N、P含量与土壤组分C、N、P含量及储量的相关关系说明,植物叶片、凋落物、腐殖质中的C、N、P供应量会影响到土壤C、N、P含量及储量。本研究表明,土壤C、N、P含量及储量与腐殖质C、N、P含量、凋落物C、P含量、叶片C、N、P含量之间均存在显著的相关关系。俞月凤等^[16]通过对喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征的研究表明,土壤组分与叶片、凋落物、腐殖质等都有不同程度的相关关系,这与本研究结果相似。土壤N含量与凋落物、叶片N含量之间均呈极显著正相关,说明叶片N含量对土壤N含量有较大的正面影响,土壤养分承自叶片和凋落物,可能是由于叶片、凋落物N含量能够影响其分解速率^[43]。而叶片、腐殖质P含量与土壤中P含量相关性不显著,这与聂兰琴等^[44]研究结果相似;研究发现,土壤中的P不仅来自于凋落物的输入,还与土壤成土母质中的矿物成分密切相关^[44],因而导致土壤P含量与叶片、腐殖质等组分之间相关性不显著。研究不同组分之间的相关性有助于揭示森林养分之间的耦合关系,在更大的尺度上和更多森林类型中探究其相关性是非常重要的课题。

4 结论

本研究以贵州脆弱生态区不同森林类型(针叶林、落叶林、针阔混交林)土壤为研究对象,揭示了不同林型之间土壤有机碳、全氮、全磷含量及储量的差异,并分析叶片、枯落物和腐殖质养分分别与土壤有机碳、全氮、全磷含量及储量之间的相关关系。研究发现,森林类型变化显著影响土壤有机碳、全磷含量及有机碳储量,有机碳含量及储量均表现为针阔混交林($30.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $60.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著高于阔叶林($22.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $48.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),全磷含量表现为针叶林($0.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于阔叶林($0.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);土壤有机碳、全氮、全磷含量及储量与叶片、腐殖质的有机碳、全氮、全磷含量、枯落物有机碳、全磷含量之间均存在显著的相关关系。

不同森林类型之间土壤的养分贮存能力存在差异,贵州脆弱生态区植被修复过程中,种植针阔混交林有利于土壤有机碳储量的积累,而种植针叶林有助于土壤全磷含量的恢复。这些研究结果可为脆弱生态区恢复土壤养分贮存能力提供数据参考和实践指导。

参考文献:

[1] 勾啸,张蒙,李海滨. 广东莲花山不同海拔梯度下森林土壤养分和化学计量特征[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(3): 82-86.

[2] 宋娅丽,康峰峰,韩海荣,等. 自然因子对中国森林土壤碳储量的影响分析[J]. 世界林业研究, 2015, 28(3): 6-12.

[3] 许宛孜,邹祖有,叶彩红,等. 江门市3种亚热带林分类型土壤碳氮磷储量分布特征[J]. 林业与环境科学, 2022(3): 34-38.

[4] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.

[5] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 134-139.

[6] FAN H B, WU J P, LIU W F, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1): 127-138.

[7] 曾晨阳,武燕,丁波,等. 贵州脆弱生态区3种森林恢复模式土壤层水源涵养能力研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(9): 95-99.

[8] 曹建华,袁道先,章程,等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.

[9] 谭玮颐,冉洁,张乔艳. 贵州省国有扎佐林场植被覆盖度动态变化研究[J]. 南方农机, 2021, 52(14): 76-78.

[10] 罗梅,杨守禄,唐红祥,等. 1963—2018年贵州修文县气温和降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 177-181, 187.

[11] 陈梦圆. 修文县种植食用百合气候适应性分析[J]. 农业与技术, 2015, 35(15): 101-102.

[12] 顾雪君. 贵州省修文猕猴桃产业的发展现状与营销对策[J]. 农家参谋, 2017(20): 34.

[13] 杨伏虎. 扎佐林场森林资源管护中的问题及应对措施[J]. 现代园艺, 2019(9): 187-188.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等. 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6247-6256.

[16] 俞月凤,何铁光,曾成城,等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 935-946.

[17] 李明军,喻理飞,杜明凤,等. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤C、N、P化学计量特征及互作关系[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7772-7781.

[18] 曹娟,闫文德,项文化,等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8.

[19] 喻林华,方晰,项文化,等. 亚热带4种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2016, 52(10): 10-21.

[20] 姜沛沛,曹扬,陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物C、N、P生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 365-372.

[21] 曾昭霞,王克林,刘孝利,等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.

[22] 陶玉华,向达永,郭普,等. 柳州市三种人工林土壤有机碳储量的空间分布[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(10): 1990-1993.

[23] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.

[24] 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.

[25] 王卫霞,史作民,罗达,等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 925-933.

[26] SCHULP C J, NABUURS G J, VERBURG P H, et al. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 482-490.

[27] OSTONEN I, LÖHMUS K, PAJUSTE K. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 212(1/2/3): 264-277.

[28] 王瑞璋,黎建强,杨关吕,等. 磨盘山典型森林生态系统土壤营养元素储量及其价值量评估[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 93-99.

[29] 石燕,武燕,王娉姿,等. 不同龄组马尾松人工林土壤表层与团聚体碳氮磷储量变化[J]. 黑龙江农业科学, 2023(5): 57-61.

[30] ZENG Z Q, WANG S L, ZHANG C M, et al. Carbon storage in evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China at four succession stages[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 677-682.

[31] 张亚冰,吕文强,易武英,等. 贵州月亮山5种森林类型土壤生态化学计量特征研究[J]. 热带亚热带植物学报,

- 2016,24(6):617-625.
- [32] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山5种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态环境学报,2019,28(1):73-82.
- [33] 何高迅,王越,彭淑娴,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [34] 弓文艳,陈丽华,郑学良.基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J].水土保持学报,2019,33(1):152-157,164.
- [35] 彭素琴,刘郁林,刘苑秋,等.针叶林补阔对土壤有机碳、氮含量的影响[J].赣南师范大学学报,2022,43(3):97-102.
- [36] 秦娟,孔海燕,刘华.马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):68-76,82.
- [37] 樊后保,李燕燕,黄玉梓,等.马尾松纯林改造成针阔混交林后土壤化学性质的变化[J].水土保持学报,2006,20(4):77-81.
- [38] 徐丽,何念鹏.中国森林生态系统氮储量分配特征及其影响因素[J].中国科学:地球科学,2020,50(10):1374-1385.
- [39] 李青桦,张玉,林玉瑄,等.西南地区不同林型凋落物-土壤氮、磷含量分布特征[J].四川农业大学学报,2021,39(3):341-347.
- [40] 张泰东,王传宽,张全智.帽儿山5种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化[J].应用生态学报,2017,28(10):3135-3143.
- [41] 肖华翠,李靖雯,夏允,等.中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(1):16-22.
- [42] 宾振钧,王静静,张文鹏,等.氮肥添加对青藏高原高寒草甸6个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J].植物生态学报,2014,38(3):231-237.
- [43] GHOLZ H L, WEDIN D A, SMITHERMAN S M, et al. Long-term dynamics of pine and hardwood litter in contrasting environments: toward a global model of decomposition [J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 751-765.
- [44] 聂兰琴,吴琴,尧波,等.鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J].生态学报,2016,36(7):1898-1906.

Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Content and Storage Distribution Characteristics of Three Forest Types in Guizhou Fragile Ecological Area

CEN Jiabao¹, WU Yan^{1,2}, XU Yanmei¹, SONG Xuehong¹, LIU Mei¹, XIE Jingyi¹, WANG Lang¹, ZHANG Hongcheng¹

(1. School of Biological Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550018, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Forest Fire Ecology and Management, Guiyang 550018, China)

Abstract: In order to explore the soil nutrient storage capacity of different forest types, soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents and storage distribution characteristics of soil of three forest types (cryptomeria conifer forest, maple broadleaf forest and needle and broad mixed forest composed of the two forest types) were analyzed in Kast Fragile Ecological Region of Guizhou Province. The coupling relationship between soil C, N, P content and storage with leaf, litter, humus C, N, P were also discussed. The results showed that, (1) the soil C, N and P contents of the three forest types were as follows: organic carbon content of coniferous forest was $26.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, total nitrogen content was $1.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and total phosphorus content was $0.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; Broad-leaved forest: organic carbon content was $22.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, total nitrogen content was $1.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, total phosphorus content was $0.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; needle and broad mixed forest: $30.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, total nitrogen content was $1.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, total phosphorus content was $0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. C, N and P reserves were as follows: organic carbon, total nitrogen and total phosphorus reserves of coniferous forest were 48.62 , 2.16 and $0.81 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively. The organic carbon, total nitrogen and total phosphorus reserves of broad-leaved forest were 48.13 , 2.21 and $0.84 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectively. The organic carbon, total nitrogen and total phosphorus reserves of needle and broad mixed forest were 60.43 , 2.37 and $0.80 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectively; (2) Forest type changes had significant effects on soil C and P contents and C reserves. The C content and C reserves of coniferous and broad-leaved mixed forests were significantly higher than those of coniferous and broad-leaved forests, while the P content of coniferous forests was significantly higher than that of broad-leaved forests. (3) Forest type changes had no significant effects on N content, N reserves and P reserves. (4) Correlation results showed that the contents of C, N and P in leaves, litter and humus were correlated with the contents and reserves of C, N and P in soil to varying degrees. To sum up, in the study area, there were obvious advantages in C content and storage in the mixed needle-wide forest, and obvious advantages in P content in the coniferous forest, and there were different degrees of correlation between leaf, litter and humus nutrients and soil nutrients.

Keywords: forest type; carbon, nitrogen and phosphorus content; carbon, nitrogen and phosphorus storage; fragile ecological region