DOI: 10.5846/stxb201506071150
彭建勤, 林成芳, 洪慧滨, 林伟盛, 熊德成, 杨智榕, 杨玉盛.中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响.生态学报,2016,36(24): - .
Peng J Q, Lin C F, Hong H B, Lin W S, Xiong D C, Yang Z R, Yang Y S.Effect of forest regeneration on soil phosphorus in mid-subtropical area.Acta Ecologica Sinica,2016,36(24): - .

中亚热带森林更新方式对土壤磷素的影响

彭建勤[1,2], 林成芳[1,2,*], 洪慧滨[1,2], 林伟盛[1,2], 熊德成[1,2], 杨智榕[1,2], 杨玉盛[1,2]
1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007
2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要:为了深入了解磷(P)在中亚热带森林生态系统内的有效性,本研究在三明市梅列区陈大采育场黄坑工区,选择天然林采伐后采取不同更新方式的多种森林,以米槠天然林为对照,研究森林不同更新方式对中亚热带森林土壤全磷、有效磷及可溶性有机磷的影响。结果显示:在 0—100 cm 土层,(1)土壤全磷平均含量大小顺序依次为米槠天然林(NF)(0.49±0.09)g/kg,米槠轻度干扰人促更新林(LAR)(0.35±0.04)g/kg,米槠强度干扰人促更新林(HAR)(0.34±0.03)g/kg,马尾松人工林(PIM)(0.32±0.02)g/kg,杉木人工林(CUL)(0.3±0.03)g/kg,人促更新林比人工林高,NF 显著高于其它的林分($P<0.05$);(2)土壤有效磷($NaHCO_3$提取)平均含量大小顺序依次为 NF(0.41±0.39)mg/kg,LAR(0.26±0.2)mg/kg,HAR(0.23±0.16)mg/kg,PIM(0.17±0.05)mg/kg,CUL(0.13±0.06)mg/kg,NF 显著高于其它林分,LAR 显著比人工林高($P<0.05$)。(3)在 0—10 cm 土层,各林分可溶性有机磷含量在夏季最高,冬季最低,温度和降水量的季节变化是影响其重要因子之一;同一季节,人促更新林比人工林高,NF 显著高于人工林($P<0.05$)。结果表明,全磷、有效磷和可溶性有机磷含量随人为干扰强度的增强呈降低趋势,其与年凋落物量和土壤有机碳储量呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关,全磷和有效磷在土壤剖面呈表聚性特征。相比于人工林经营,采取人促天然更新的方式,更有利于中亚热带森林养分的贮存和转化,有利于森林的长期经营和管理。

关键词:更新方式;天然林;全磷;有效磷;可溶性有机磷

Effect of forest regeneration on soil phosphorus in mid-subtropical area

PENG Jianqin[1,2], LIN Chengfang[1,2,*], HONG Huibin[1,2], LIN Weisheng[1,2], XIONG Decheng[1,2], YANG Zhirong[1,2], YANG Yusheng[1,2]
1 *School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007, *China*
2 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: To better understand the availability of phosphorus (P) in mid-subtropical forest ecosystems, various forests that originated from natural tree felling were selected in the Huangkeng work area of the Chenda state-owned forestry farm, and the effect of different regeneration patterns on soil total, available, and dissolved organic P were studied. The results indicated that, in the 0—100 cm soil layer, (1) Average soil total P content from highest to lowest was 0.49 ± 0.09 g/kg in the *Castanopsis carlesii* forest (NF), 0.35 ± 0.04 g/kg in the mild disturbance forest with natural regeneration (LAR), 0.34±0.03 g/kg in the intensive disturbance forest with natural regeneration (HAR), 0.32 ± 0.02 g/kg in the *Pinus massoniana* plantation (PIM), and 0.3±0.03 g/kg in the *Cunninghamia lancealata* plantation. Natural regeneration forests had higher total P than plantations, and total P for NF was significantly higher than that of the plantations ($P< 0.05$). (2) Average soil available P content ($NaHCO_3$extraction) from highest to lowest was 0.41±0.39 mg/kg for NF, 0.26 ± 0.2 mg/kg for LAR, 0.23 ± 0.16 mg/kg for HAR, 0.17 ± 0.05 mg/kg for PIM, and 0.13 ± 0.06 mg/kg for CUL. Available P of

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31270584);国家自然科学基金重点项目(31130013)
收稿日期:2015-06-07; **网络出版日期**:2015-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail:tonylcf99@163.com

LAR was significantly higher than that of plantations ($P< 0.05$). (3) In the 0—10 cm soil layer, dissolved organic P content was highest in summer and lowest in winter for every forest type, which was probably caused by seasonal changes in temperature and precipitation. In the same season, dissolved organic P from NF was significantly higher than that of plantations ($P< 0.05$), and dissolved organic P is natural regeneration forests was higher than in plantations. Correlation analysis showed total P, available P, and dissolved organic P were significantly positively correlated with litterfall and soil organic carbon storage, but had a significant negative correlation with soil bulk density, and exhibited a declining trend with increasing human disturbance. Total P and available P in the soil profile exhibited characteristics of surface accumulation. Compared to plantation management, natural forest regeneration was more conducive to storage and transformation of nutrients, and for the long-term management of the mid-subtropical forests.

Key Words: regeneration method; natural forest; total phosphorus; available phosphorus; dissolved organic phosphorus

磷(Phosphorus,P)是植物生长发育的必需营养元素之一。植物所需要的磷主要来源于土壤,土壤是磷在生态系统中的最大储存库[1]。土壤中全磷含量较高,但磷素利用率较低。尤其在我国南方地区,土壤磷素有效性极低,成为南方生态系统生产力和生态过程的重要养分限制因子[2]。土壤全磷表示土壤磷素的总储量,是衡量磷素营养水平的参考指标,主要来源于成土母质和动植物残体的归还,也与人类生产活动有关[3]。土壤有效磷作为土壤中可被植物吸收的组分,是土壤磷素养分直接供应水平高低的指标[4]。土壤有机磷是土壤磷素的重要组成部分,对土壤肥力和植物营养有着重要影响,我国大部分土壤有机磷占全磷的 20%—40%[5]。用 $NaHCO_3$提取的磷包括部分无机和有机磷,有机态部分主要是可溶性有机磷(Dissolved Organic Phosphorus,DOP),它易于矿化而被利用[6]。土壤有机磷是植物有效性磷的重要来源,在磷含量较低或固定严重的土壤中,有机磷的作用更大[7]。在全球变化的背景下,森林土壤磷素的响应直接影响到森林的碳储藏。

近数十年来,我国南方大面积天然常绿阔叶林被采伐,受到人为不同程度的干扰,形成各种人促天然更新林和皆伐后经营的人工林[8]。以米槠(*Castanopsis carlesii*)为建群种的常绿阔叶林是我国东部湿润亚热带山地海拔<500 m 以下常绿阔叶林的重要群系之一,而以米槠为主的人工促进天然更新林在闽西北有较大面积经营,已成为中亚热带经营地带性植被十分有效的模式[9]。同时,经营杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林也有较长的历史,也受到众多学者的广泛关注[10-12]。这种通过炼山烧去林地采伐剩余物的方式,便于林地更新作业,并能利用早期大量速效养分,促进幼树生长,因而这种人工更新(人工栽植实生苗或扦插造林)的方式也被广泛采用。但其过分强调大面积集中连片,易造成林分树种单一、造林纯林化和针叶化、林分结构不稳定等生态问题。林分土壤养分状况作为度量森林生态系统可持续经营的重要指标[13],是评价不同更新方式后林分养分循环的重要参考。

目前本区域森林更新方式的研究主要集中在林分结构及生产力[14]、物种多样性[15]、植被生长和土壤理化性质[16],以及叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征[12]等方面,而对米槠天然林采取不同更新方式后土壤磷素变化还鲜有报道。因此我们在福建省三明市,选择天然林采伐后在不同更新方式下形成的各种林分为研究对象,探讨土壤中全磷、有效磷的变化及可溶性有机磷的季节动态特征,以揭示不同更新方式对中亚热带森林土壤磷素的影响,为我国中亚热带森林经营和管理实践提供理论依据,并对该本区在全球变化背景下土壤磷素循环的响应研究打下基础。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验地设在福建省三明市陈大镇采育场黄坑工区(26°19′N,117°36′E)和格氏栲自然保护区(26°11′N,117°28′E)内,与武夷山脉相连,平均海拔为 300 m,平均坡度为 25°—35°,属中亚热带季风气候。年平均气温

为 19.1 ℃,年平均降水量为 1749 mm(主要集中于 3—8 月份),相对湿度为 81%,年日照时数为 1706 h。

米槠天然林(*Castanopsis Lanceolata*)位于三明市格氏栲自然保护区内,现有面积约 190 hm^2,植被属中亚热带常绿阔叶林地带。以米槠为建群树种,其它树种有木荷(*Schima superba*)、桂北木姜子(*Litsea subcoriace*)、赤楠(*Radix syzygii*)、冬青(*Ilex pubescens*)等。林下地被层较厚,并且散布着枯立木、倒木和死树枝杆等,枯枝落叶厚度为 5—8 cm。

陈大镇林业采育场内分布着由米槠天然林受不同强度人为干扰后,形成的年龄相近(约 40 年)的米槠轻度干扰人促更新林、米槠强度干扰人促更新林、杉木人工林和马尾松人工林,而这些不同的林型构成了不同的更新方式梯度和生物多样性梯度,为土壤养分等研究提供了良好的天然试验基地。米槠轻度干扰人促更新林由米槠天然林经过择伐后,封山育林,经过自然次生演替形成,主要树种有米槠(*Castanopsis Lanceolata*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)等。米槠强度干扰人促更新林为采伐时保留木和林下幼树,采伐后迹地保留剩余物,残留的枝桠、树梢等沿水平带平铺堆积以促其腐烂,其主要树种有米槠(*Castanopsis Lanceolata*)、东南野桐(*Malloyus lianus*)等,草本层植物也十分丰富,分布连续,由草珊瑚(*Sarcabdra glabra*)、山姜(*Alpinia japonica*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等组成。散布着枯立木、倒木和死树枝杆等,枯枝落叶厚度 5—7 cm。杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松人工林(*Pinus massoniana*)为皆伐后,经火烧、挖穴造林和幼林抚育营造的人工纯林,林冠单层,林下植被主要为狗骨柴(*Tricalysia dubia*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)、新木姜子(*Neolitsea aurata*)等,不同更新方式下林分详细概况参见表 1。

表 1　试验地的基本特征和土壤表层(0—20 cm)理化性质(平均值±标准差)

Table 1　Main characteristic and topsoil (0—20 cm) properties of experiment site (Mean±SD)

因子 Parameters	林分类型 Forest type				
	米槠天然林 NF	米槠轻度干扰人促更新林 LAR	米槠强度干扰人促更新林 HAR	杉木人工林 CUL	马尾松人工林 PIM
海拔 Altitude/m	315	315	308	301	303
坡度 Slope	35	28	37	30	35
林龄 Stand age/年	~200	35	35	36	36
平均树高 Mean tree height/m	11.90	10.80	13.70	18.20	18.40
平均胸径 Mean *DBH*/cm	20.00	14.30	14.90	15.60	16.30
林分密度 Stand density/(株/hm^2)	1955	3788	2158	2858	1500
细根生物量 Fine root biomass/ (kg/m^3)	1.20	0.93	0.70	0.77	0.35
全 N Total N/(g/kg^1)	1.34	1.60	1.22	1.70	1.17
pH(H_2O)	4.04±0.25	4.47±0.01	4.42±0.02	4.49±0.16	4.63±0.14

NF:米槠天然林 natural *Castanopsis carlesii* forest; LAR:米槠轻度干扰人促更新林 mild disturbance forest with natural regeneration; HAR:米槠强度干扰人促更新林 intensive disturbance forest with natural regeneration; CUL:杉木人工林 *Cunninghamia lancealata* plantation; PIM:马尾松人工林 *Pinus massoniana* plantation

1.2　采样与测定方法

1.2.1　采样

土壤取样分别于 2010 年秋季、冬季、2011 年春季和夏季分别进行取样,具体时间为每次取样的月底(28 日)进行。在各林分每个样方(每个林分各包含 3 个 20 m×20 m 样方)中按“S”型方式进行取样。用内径 5 cm 的土钻在每个样方进行多点(15—20)混合取样,深度为 1 m,分别为 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 土层,并把各个样方中相同土层土样分别混合均匀,将土壤表层植物残体等杂物去除,分别贴上标签。取样完成后将土壤样品带回实验室进行处理,并放置于避光通风处进行自然风干。风干后选取一部分土样过 0.25 mm 和 2 mm 筛分别放置于棕色土壤样品瓶内,分别测定全磷和有效磷及 PH 值等理化性质。

按随机加布局控制的原则在样地的上、中、下坡,分别布设 15 个 0.5 m×0.5 m 的 1 mm 孔径的尼龙网凋落

物收集框,离地面高 20—25 cm 水平放置。在每月月底收集每个框内的地上凋落物,并分为叶、枝(包括树皮和枝皮)、花、果(包括种子)和杂(鸟粪、蛹、小动物残体等),然后在 80℃下烘干至恒质量后称重,计算样品的含水量和单位面积凋落物量。

1.2.2 测定方法

全磷测定采用 $HClO_4$-H_2SO_4法,用 $NaHCO_3$提取有效磷,钼锑抗比色法测定。可溶性有机磷用差减法算出,即 DOP = TDP-DIP[17]。称取 1.25 g 土样加入 12.5 mL 水,土样与浸提剂分别混合后,在 25℃条件下恒温气浴涡振荡仪分别振荡 30 min(150 r/rain),取出后离心(25 ℃,10 min,10000 r/min),再用定量滤纸过滤。一部分滤液用钼蓝比色法测定有效性无机磷,另一部分滤液 ICP-AES(Iris advantage)测定可溶性总磷,可溶性总磷与有效性无机磷的差值即为可溶性有机磷。用重络酸钾氧化-分光光度法测定土壤有机碳含量,土壤容重采用环刀法。

1.3 数据处理

利用 SPSS 19.0、Excel 2003 和 Origin 8.5 软件进行统计分析和作图。所有数据在分析之前先进行正态分布检验(Kolmogiriv-Smirnov 检验),用单因素方差分析多重比较方法中的 LSD 方法检验不同新方式下各林分土壤全磷、有效磷含量及 DOP 季节性差异,显著性水平设定为 $P=0.05$。

2 结果与分析

2.1 不同更新方式下土壤全磷含量的变化

米槠天然林(NF)更新为米槠轻度干扰人促更新林(LAR)、米槠强度干扰人促更新林(HAR)、杉木人工林(CUL)和马尾松人工林(PIM)后土壤全磷含量的变化如图 1 所示,米槠天然林在各土层全磷含量都比其它林分高,人促更新林高于人工林。在 0—10 cm 土层,NF 最高为 0.48±0.02 g/kg,分别比 LAR、HAR、CUL、PIM 高 14.5%、18.7%、31.2%和 33.4%,显著高于其它各林分(P <0.05),LAR、HAR 分别为(0.41±0.03)g/kg、(0.39±0.02)g/kg,比 CUL、PIM 高。在 10—20 cm 土层,NF 最高为(0.43±0.04)g/kg,分别比 LAR、HAR、CUL、PIM 高 10.4%、16.7%、27.9%和 20.8%,显著高于 CUL、PIM(P <0.05),LAR 显著比 CUL、PIM 高(P <0.05)。在 20—40 cm 土层,相比于 NF,LAR 为(0.36±0.02)g/kg,比 CUL(0.3±0.03 g/kg)和 PIM(0.35±0.02 g/kg)高。在 40—60 cm 土层,NF 最高为 0.62±0.03 g/kg,并显著高于其它林分(P<0.05),人促更新林高于人工林。在 60—80 cm 土层,除 LAR(0.33±0.02 g/kg)外,NF(0.39±0.01 g/kg)显著比其它林分高(P<0.05)。在 80—100 cm 土层,NF 比 CUL 和 PIM 分别高 30%、35%,均具有显著性差异(P<0.05),人促更新林比人工林高,但差异不显著(P >0.05)。

如图 1 所示,各林分土壤中全磷含量大致随土层深度增加而降低,NF 在 40—60 cm 土层最高为(0.62±0.03)g/kg,其它林分都在土壤表层(0—10 cm)全磷含量最高,呈表聚性特征。除 NF 在 40—60 cm 和 10—20 cm 与其它土层有显著差异外,其它林分土层之间差异不显著(P >0.05)。在 0—100 cm 土层内,不同更新方式下土壤全磷平均含量大小顺序为 NF(0.49±0.09 g/kg),LAR(0.35±0.04 g/kg),HAR(0.34±0.03 g/kg),PIM(0.32±0.02 g/kg),CUL(0.3±0.03 g/kg),NF 显著高于其它林分(P<0.05),说明土壤中全磷含量随人为干扰强度增强呈降低趋势。

2.2 不同更新方式下土壤有效磷含量的变化

米槠天然林(NF)更新为米槠轻度干扰人促更新林(LAR)、米槠强度干扰人促更新林(HAR)、杉木人工林(CUL)和马尾松人工林(PIM)后土壤有效磷含量的变化如表 2 所示,NF 土壤中有效磷在各土层均高于其它林分,人促更新林虽比人工林高,但差异显著性也因土层而异。在 0—10 cm 土层,NF 最高为(1.2±0.13)mg/kg,分别比 LAR、HAR、CUL、PIM 高 45.8%、58.3%、83.3%和 76.7%,显著的高于其它林分(P<0.05)。在 10—20 cm 土层,除 LAR(0.28±0.01 mg/kg)外,NF(0.38±0.06 mg/kg)显著高于其它各林分(P<0.05),人促更新林比人工林高(P >0.05)。在 20—40 cm 土层,各林分土壤有效磷含量比 NF 低,LAR(0.18±0.06 mg/kg)、

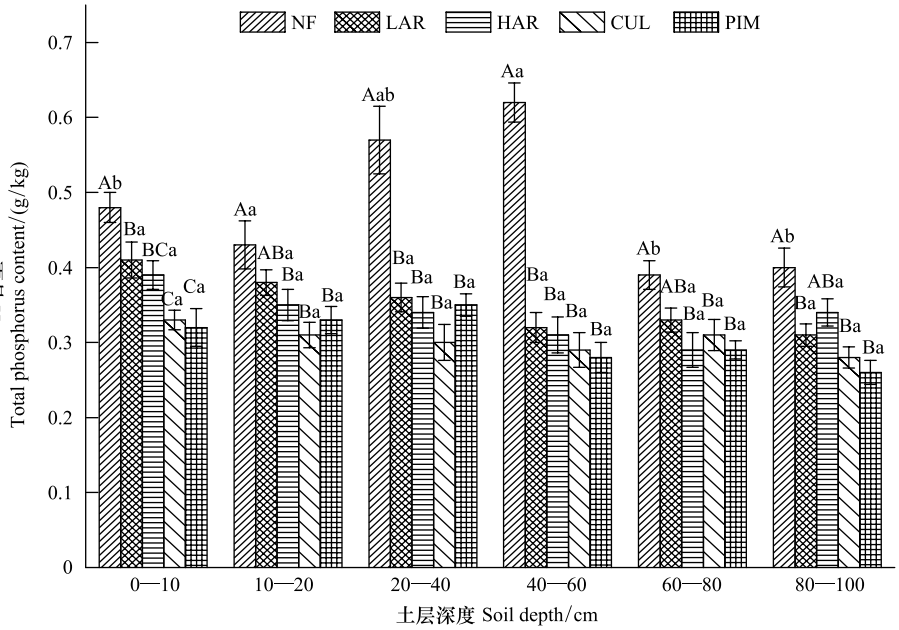

图 1　不同更新方式的土壤全磷含量(平均值±标准差,g/kg)

Fig.1　The total P content for different forest types (Mean±SD, g/kg)

NF:米槠天然林 natural *Castanopsis carlesii* forest; LAR:米槠轻度干扰人促更新林 mild disturbance forest with natural regeneration; HAR:米槠强度干扰人促更新林 intensive disturbance forest with natural regeneration; CUL:杉木人工林 *Cunninghamia lancealata* plantation; PIM:马尾松人工林 *Pinus massoniana* plantation;图中不同大写字母、小写字母分别代表相同土层不同林分和相同林分不同土层间差异显著 (n=6)

HAR(0.16±0.05 mg/kg)比 CUL(0.12±0.03 mg/kg)、PIM(0.15±0.01 mg/kg)高。在 40—60 cm 土层,NF 显著高于其它各林分(P<0.05),人促更新林比人工林高,但没有显著差异(P >0.05)。在 60—80 cm 土层,PIM 最低为 0.08±0.02 mg/kg,分别比 NF、LAR、HAR、CUL 低 60%、52.9%、55%和 57.8%,显著低于其它各林分(P<0.05)。在土层 80—100 cm,NF(0.17±0.02 mg/kg)比其它各林分高,PIM 最低为 0.07±0.03 mg/kg,显著低于其它各林分(P<0.05),其它各林分间差异不显著(P >0.05)。

表 2　不同更新方式的土壤有效磷含量(平均值±标准差, mg/kg)

Table 2　The available P content for different forest types (Mean±SD, mg/kg)

土层/cm Soil layer	米槠天然林 NF	米槠轻度干扰人 促更新林 LAR	米槠强度干扰人 促更新林 HAR	杉木人工林 CUL	马尾松人工林 PIM
0—10	1.20±0.13Aa	0.65±0.03Ba	0.56±0.15Ba	0.20±0.17Ca	0.28±0.01Ca
10—20	0.38±0.06Ab	0.28±0.01ABb	0.24±0.32Bb	0.19±0.24Ba	0.20±0.05Bab
20—40	0.28±0.01Abc	0.18±0.06ABbc	0.16±0.05Bbc	0.12±0.03Bab	0.15±0.01Bb
40—60	0.23±0.08Ac	0.15±0.10ABc	0.13±0.09ABc	0.10±0.12Bab	0.11±0.04Bb
60—80	0.20±0.03Ac	0.17±0.10Ac	0.18±0.01ABbc	0.08±0.02Bb	0.19±0.02Aab
80—100	0.17±0.02Ac	0.12±0.03Ac	0.14±0.06Ac	0.07±0.03Bb	0.13±0.01Ab

表中不同大写字母、小写字母分别代表相同土层不同林分和相同林分不同土层间差异显著 (n=6)

由表 2 所示,各林分在土壤表层(0—10 cm)有效磷含量最高,以米槠天然林最高为 1.2±0.13 mg/kg,在土壤深层(80—100 cm)最低,以 PIM 最低为 0.07±0.03 mg/kg。各林分土壤表层(0—10 cm)与深层(80—100 cm)之间差异显著(P<0.05),随土层深度的增加而降低,呈表聚性特征。在 0—100 cm 土层内,土壤有效磷平均含量大小顺序为:NF(0.41±0.28 mg/kg)、LAR(0.26±0.20 mg/kg)、HAR(0.23±0.16 mg/kg)、PIM(0.17±0.05 mg/kg)、CUL(0.13±0.06 mg/kg),NF 显著高于其它林分(P<0.05),说明土壤有效磷含量随人为干扰强度的增强呈降低趋势。

2.3 不同更新方式下 DOP 含量的季节动态

米槠天然林(NF)更新为米槠轻度干扰人促更新林(LAR)、米槠强度干扰人促更新林(HAR)、杉木人工林(CUL)和马尾松人工林(PIM)后可溶性有机磷(DOP)含量的季节变化如图 2 所示,各林分土壤 DOP 含量从春季到夏季增长,夏季到冬季降低;夏季显著高于秋、冬季节(P<0.05),春季差异性因林分而异。

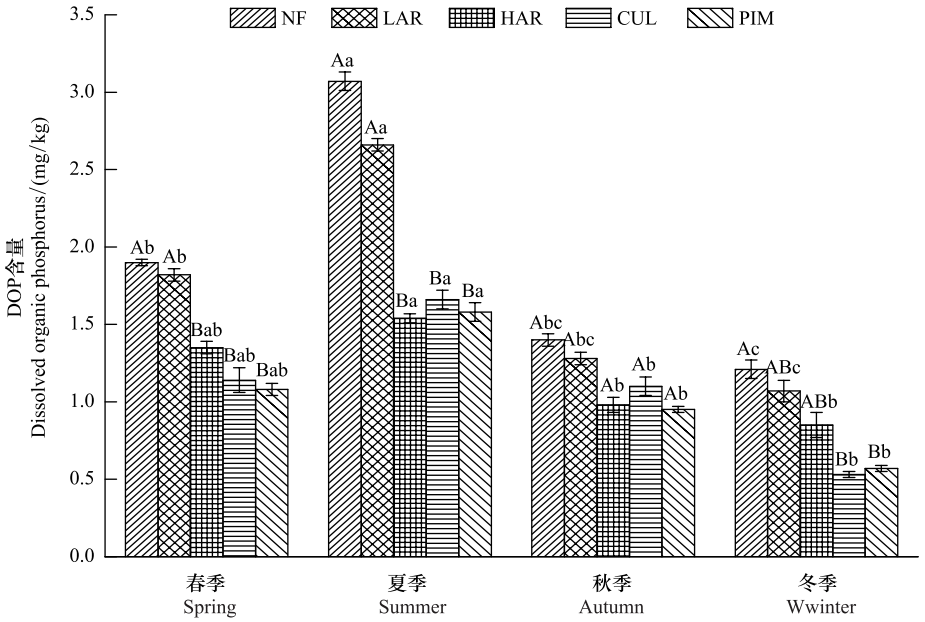

图 2 DOP 含量的季节变化(0—10cm)(平均值±标准差, mg/kg)

Fig.2 Seasonal changes of DOP content (0—10cm) (Mean±SD, mg/kg)

图中不同大写字母、小写字母分别代表相同土层不同林分和相同林分不同土层间差异显著(n=6)

由图 2 所示,同一季节,NF 土壤可溶性有机磷(DOP)显著高于人工林(P<0.05),人促更新林与人工林之间也因人为干扰强度的不同而异。在春季,NF 土壤 DOP 含量最高为 1.9±0.02 mg/kg,显著高于人工林(P<0.05),而与 LAR(1.82±0.04 mg/kg)没有显著的差异(P >0.05)。在夏季,NF 土壤 DOP 含量达全年最高为(3.07±0.06)mg/kg,并显著高于 HAR(1.54±0.03 mg/kg)、PIM(1.58±0.07 mg/kg)和 CUL(1.66±0.06 mg/kg)(P<0.05),而与 LAR(2.66±0.04 mg/kg)差异不显著(P >0.05)。在秋季,NF(1.4±0.04 mg/kg)虽高于其它林分,而差异不显著(P >0.05),HAR(0.98±0.05 mg/kg)比 PIM(1.1±0.06 mg/kg)低。在冬季,NF(1.21±0.05 mg/kg)显著高于 CUL(0.53±0.02 mg/kg)和 PIM(0.57±0.03 mg/kg),人促更新林虽比人工林高,但没有显著差异(P >0.05)。一年中,各林分土壤 DOP 含量随降水量增加呈升高的现象,降水量可能是影响其季节变化的重要因子(图 3)。

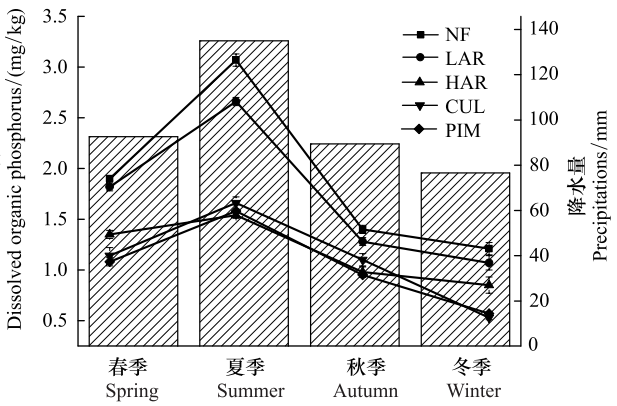

图 3 不同林分土壤 DOP 含量与降水量的季节变化

Fig.3 The seasonal variation of different forest soil DOP content and precipitation

2.4 土壤全磷、有效磷含量与年凋落物量、土壤容重及有机碳储量的关系

由表 3 所示,随人为干扰强度的增强年凋落物量、有机碳储量呈降低的趋势,土壤容重呈增长的趋势。年凋落物量大小依次为 NF(1155.70 g/m^2)、LAR(688.10 g/m^2)、HAR(687.10 g/m^2)、PIM(654.10 g/m^2)、CUL(594.80 g/m^2);土壤有机碳储量大小顺序依次为 NF(75.67 t/hm^2)、LAR(58.38 t/hm^2)、PIM(51.76 t/hm^2),CUL(50.84 t/hm^2)、HAR(50.14 t/hm^2);土壤容重大小依次为 PIM(1.41±0.02 g/cm^3)、CUL(1.33±0.05 g/

cm^3)、LAR(1.32±0.03 g/cm^3)、HAR(1.21±0.04 g/cm^3)、NF(1.12±0.13 g/cm^3)。

表 3　不同林分土壤容重、有机碳储量(0—20 cm)和凋落物的变化(平均值±标准差)

Table 3　The soil bulk density, organic carbon storage (0—20 cm) and litterfall for different forests (Mean±SD)

林分 Forest stands	米槠天然林 NF	米槠轻度干扰人促更新林 LAR	米槠强度干扰人促更新林 HAR	杉木人工林 CUL	马尾松人工林 PIM
土壤容重 Soil bulk density /(g/cm^3)	1.12±0.13	1.32±0.03	1.21±0.04	1.41±0.02	1.33±0.05
年凋落物量 Litterfall/(g/cm^2)	1155.70	688.10	687.70	654.10	594.80
有机碳储量 organic carbon storage/(t/hm^2)	75.67	58.38	50.14	51.76	50.84

由不同林分土壤全磷、有效磷含量和可溶性有机磷含量与年凋落物量、土壤容重及有机碳储量的 Pearson 相关分析显示,全磷、有效磷含量与年凋落物量和有机碳储量呈显著的正相关,与土壤容重呈显著负相关($P<0.05$);可溶性有机磷与有机碳储量相关性不显著(表 4)。

表 4　土壤全磷、有效磷和可溶性有机磷与其土壤容重、年凋落物量、有机碳储量 Pearson 相关系数 ($n=10$)

Table 4　Correlations between soil total phosphorus, available phosphorus, dissolved organic phosphorus and its correspondent annual Litterfall, soil bulk density, organic carbon storage ($n=10$)

因子 Parameters	全磷 (TP)	有效磷 (AP)	可溶性有机磷 (DOP)
土壤容重 soil bulk density /(g/cm^3)	-0.940**	-0.914**	-0.971**
年凋落物量 annul litterfall/(g/cm^2)	0.887**	0.927**	0.796*
有机碳储量 organic carbon storage/(t/hm^2)	0.903**	0.916**	0.542

* $P<0.05$; ** $P<0.01$; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; DOP: Dissolved Organic Phosphorus

3　讨论

3.1　不同更新方式对土壤全磷、有效磷的影响

森林凋落物是林地有机质的主要来源,是森林生态系统物质循环和能量流动的重要途径,凋落物归还的养分对维持林地肥力具有重要作用。本研究中凋落物量随人为干扰强度增强呈降低趋势(表 3),与邓旺灶[16]研究结果一致。这可能是由于米槠天然林由天然更新形成,具有较为稳定的群落结构,凋落物归还量较高,而人促更新林和人工林在更新过程中受人为干扰的影响,林下植被较少,群落结构较单一,从而使凋落物归还量减少。同时,本研究中土壤全磷、有效磷含量随人为干扰强度增强呈降低的趋势,与汤景明等[13]研究结果相似。相关分析表明,凋落物量与全磷、有效磷含量呈显著正相关(表 4),表明森林凋落物归还量的降低可能是影响其土壤全磷、有效磷含量降低的主要原因之一。樊纲惟[18]等也研究表明,土壤有效磷含量受凋落物生物量和腐殖质层全磷含量的影响。也有类似研究显示,植被盖度与土壤有效磷含量呈显著正相关,表明林分植被盖度不同也会影响到有效磷含量[19]。但有研究者认为,气温和降水是表层土壤全磷含量主控因子之一[20],区域自然环境差异可能是影响研究结果差异的原因。与人工造林更新方式相比,本研究中人促天然更新方式更有利于林分土壤肥力的恢复和维持,与莫江明[21]、范广阔[22]等人研究相似。因此,在森林经营管理过程中,应重视利用天然更新森林生态系统的“自肥机制”,提高土壤有机质和养分含量,从而改善森林的结构和功能。

由表 3 所示,米槠天然林土壤容重低于更新后的其它林分,并随人为干扰强度增强呈增大的趋势,与陈爱玲[23]、汤景明[13]等研究结果一致。相关分析显示,土壤容重与全磷、有效磷呈显著负相关(表 4)。天然林采伐后更新起来的各种林分,土壤全磷、有效磷含量下降,这与这些林分在更新过程中受到不同程度的人为干扰有关。干扰导致土壤温度、水分和植被等条件的改变,引起土壤结构及微生物的变化,也会影响到 N、P 等养分元素的流动与周转[24]。

本研究结果发现米槠天然林土壤有机碳储量比其它林分高 (表 3),土壤有机碳储量与全磷、有效磷含量

呈显著正相关(表 4),与 Hou 等[25]研究结果相似。这可能是天然林更新后凋落物归还数量减少、水土流失加剧及人为干扰对表层土壤的扰动引起土壤有机质加速分解等因素有关,从而使有机碳储量降低。Allison 等[26]研究表明,土壤有机碳含量的增加可为土壤微生物提供更多能源,使参与土壤有机磷矿化的磷酸酶活性提高,因而有机碳含量的增加也可能会提高土壤中磷素含量。但 Huang 等[27]研究认为,在亚热带成熟森林,土壤表层磷有效性可能随土壤有机碳的持续积累而降低,但对深层土壤研究还有待进一步研究。在我国东北淡水湿地和河岸相关研究显示,土壤有机碳浓度与可溶性有机磷浓度呈显著的正相关[28],与本研究存在差异,可能受地域环境差异、土壤类型及其理化性质差异的影响。

3.2 不同更新方式下土壤全磷、有效磷垂直分布特征

研究显示,土壤中全磷、有效磷随土层深度的增加而减小,呈表聚性特征,这种表聚性特征可能是由于林分凋落物周转较快,林下凋落物分解、植物死亡及枯草腐败后,向表层土壤添加大量的养分所致[29]。Jobbágy 等[30]研究也认为,植物通过根系能够吸收土壤表层和下层的磷素及其它矿质养分,同时也通过凋落物归还向地表添加 N、P 和其它养分。随着森林的发育,磷素在土壤表层持续累积,因而凋落物归还是影响森林土壤全磷、有效磷含量在土层剖面有较大差异的主要因素。Anderson 等[31]研究认为,土壤养分间以微生物为纽带存在耦合关系,土壤微生物是土壤有机质和养分转化和循环的动力,既是土壤养分的重要来源,又是土壤养分的储存库。已有研究表明,林下土壤细菌、真菌和放线菌数量及 MBC、MBN 和 MBP 含量随土层深度增加而减小,呈表聚性特征,且土壤有效磷与微生物量碳、氮、磷呈极显著正相关[32],因而土壤微生物在土层剖面上的差异也可能会影响磷素的分布。Liu 等[33]对不同年龄林分土壤磷素剖面研究显示,年龄为 80 a 的林分随土层深度增加,全磷浓度趋向于增加或无变化;而年龄为 400 a 的林分全磷浓度随土层深度显著降低,因而林分年龄也可能会影响土壤磷素在土层上的分布。此外,根系作为植物吸收养分的主要器官,其生长中分布格局的不同,也会影响到土壤养分含量及其分布的差异[34]。总之,磷素这种表聚性特征除受凋落物归还影响外,也与林分土壤发育、微生物活性、一系列生物化学过程及人为活动有关。

3.3 不同更新方式对 DOP 的影响

气温和降水是影响森林土壤可溶性有机磷(DOP)季节变化的重要因素之一。研究显示,各林分土壤 DOP 含量从春季到夏季提高,夏季到冬季呈降低现象,与中亚热带地区气温和降水的季节性变化一致(图 3),表明气温和降水是影响土壤 DOP 的重要因素之一。同时,有研究表明,夏季土壤中 DOP 含量高于其它季节,可能受有机磷矿化加速的影响[35],因为有机磷矿化过程主要取决于微生物活动和磷酸酶活性,其受温度和降水量的制约[36]。海龙等[37]研究也认为土壤有机磷含量与降水量、有机质含量等因素有关。Tipping 等[38]研究表明,夏季土壤中 DOC 浓度高于冬季,降水量是影响其重要因素之一。

在森林生态系统中,土壤 DOP 含量除受到磷素形态和环境限制外,也受到人为因素的影响[39]。由不同林分土壤 DOP 与土壤容重及年凋落物量 Pearson 相关分析显示,土壤 DOP 含量与土壤容重呈显著负相关,与凋落物量呈显著正相关(表 4)。在米槠天然林更新中随着人为干扰强度增强,林分凋落物量归还减少及土壤容重增大,使土壤结构性变差,可能是导致米槠天然林 DOP 显著高于人工林,人促更新林较人工林高的重要原因。Frizano 等[40]研究发现,滑坡地上森林更新后土壤有机磷上升,而凋落物的归还是提高土壤有机磷的主要原因。

4 结论

研究表明,中亚热带森林土壤全磷、有效磷具有表聚性特征,其含量随人为干扰强度的增强呈降低的趋势。森林的凋落物归还、土壤容重和有机碳储量的不同,是森林土壤全磷、有效磷含量和可溶性有机磷含量差异的主要因素。森林土壤可溶性有机磷季节变化受温度和降雨季节变化的影响。因此与人工造林相比,采取人促天然更新方式更有利于土壤磷素的储存。

参考文献(References):

[1] 龚霞, 牛德奎, 赵晓蕊, 鲁顺保, 刘苑秋, 魏晓华, 郭晓敏. 植被恢复对亚热带退化红壤区土壤化学性质与微生物群落的影响. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1094-1100.

[2] 赵晓蕊, 郭晓敏, 张金远, 牛德奎, 单连友, 张文元, 魏晓华, 陈伏生, 黄尚书. 武功山山地草甸生态系统土壤无机磷垂直地带性分布特征. 草业科学, 2014, 31(9): 1610-1617.

[3] Lu R K. Methods of Agricultural Chemical Analysis is Soil. Beijing: Chinese Agricultural science and Technology Press, 1999:107-178.

[4] 刘文静, 张平究, 董国政, 孔令柱, 郑真, 司红君. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2654-2662.

[5] Tarafdar J C, Claassen N. Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. Biology and Fertility of Soils, 1988, 5(4): 308-312.

[6] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 1-9.

[7] Tarafdar J C, Claassen N. Preferential utilization of organic and inorganic sources of phosphorus by wheat plant. Plant and soil, 2005, 275(1/2): 285-293.

[8] 陈绍栓, 陈淑容, 马祥庆. 次生阔叶林不同更新方式对林分组成及土壤肥力的影响. 林业科学, 2001, 37(6): 113-117.

[9] 林开淼, 郭剑芬, 杨智杰, 纪淑蓉, 杨玉盛. 不同林龄人促天然更新林土壤磷素形态及有效性分析. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(9): 6-11.

[10] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 谢锦升, 俞新妥. 杉木多代连栽后土壤肥力变化. 土壤与环境, 2001, 10(1): 33-38.

[11] 林伟盛, 杨智杰, 郭剑芬, 黄咏梅, 王家骏, 吴波波, 刘小飞, 吕理兴, 陈光水. 米槠天然林转变成杉木人工林后土壤可溶性有机碳的变化. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(1): 41-47.

[12] 康根丽, 杨玉盛, 司友涛, 尹云锋, 刘翥, 陈光水, 杨智杰. 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征. 生态学报, 2014, 34(8): 1946-1955.

[13] 汤景明, 戴汉会, 荀继刚, 翟明普. 山地常绿落叶阔叶混交林更新方式对林地肥力的影响. 湖北林业科技, 2010, (116): 7-10.

[14] 黄清麟, 郑群瑞, 戎建涛, 卓鸣秀, 官晓辉. 福建中亚热带天然阔叶用材林择伐技术Ⅰ.基于树种特征的目标树种清单. 山地学报, 2012, 30(2): 180-185.

[15] 宋晓英, 牛树奎, 彭彪, 柯玉琼. 福建三明不同更新方式的米槠林物种多样性研究. 亚热带植物科学, 2006, 35(2): 31-34.

[16] 邓旺灶. 不同更新方式对中亚热带森林土壤理化性质的影响. 亚热带资源与环境学报, 2011, 6(3): 18-23.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[18] 樊纲惟, 项文化, 雷丕峰, 邹丽梅. 亚热带常绿阔叶林土壤磷素空间分布特征及其影响因素. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 367-370.

[19] 刘文杰, 陈生云, 胡凤祖, 莎娜. 疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(17): 5429-5437.

[20] 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.

[21] 莫江明. 鼎湖山退化马尾松林、混交林和季风常绿阔叶林土壤全磷和有效磷的比较. 广西植物, 2005, 25(2): 186-192.

[22] 范广阔, 邹双全, 林开敏, 何宗明, 郭玉硕, 曹永康. 不同更新方式对杉木林土壤肥力的影响. 福建林学院学报, 2009, 29(3): 210-214.

[23] 陈爱玲, 游水生, 林德喜. 阔叶林地在不同更新方式下土壤理化性质的变化. 浙江林学院学报, 2001, 18(2): 127-130.

[24] Álvarez-Yépiz J C, Martínez-Yrízar A, Búrquez A, Lindquist C. Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forests in northwestern Mexico. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 355-366.

[25] Hou E Q, Chen C R, Wen D Z, Liu X. Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China. Soil Research, 2014, 52(1): 55-63.

[26] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(5): 937-944.

[27] Huang W J, Zhou G Y, Liu J X. Nitrogen and phosphorus status and their influence on aboveground production under increasing nitrogen deposition in three successional forests. Acta Oecologica, 2012, 44: 20-27.

[28] Wang G P, Liu J S, Wang J D, Yu J B. Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China). Geoderma, 2006, 132(1/2): 59-74.

[29] 吴艳宏, 周俊, 邴海健, 余东, 孙守琴, 罗辑. 贡嘎山海螺沟典型植被带总磷分布特征. 地球科学与环境学报, 2012, 34(3): 70-74.

[30] Jobbágy E G, Jackson R B. The uplift of soil nutrients by plants: Biogeochemical consequences across scales. Ecology, 2004, 85(9): 2380-2389.

[31] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98(1/3): 285-293.

[32] 葛萍, 蔡婷, 达良俊, 崔易翀, 王跃宏, 余方德. 不同恢复时期马尾松次生林土壤养分与微生物的演变. 中国农学通报, 2014, 30(22): 22-27.

[33] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.

[34] 范士超, 张海林, 黄光辉, 孙国峰, 隋鹏. 不同间伐模式下杨农复合系统土壤养分垂直分布特征. 华北农学报, 2010, 25(S2): 236-241.

[35] McDowell R W, Condron L M, Stewart I. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(5): 707-715.

[36] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展. 水土保持研究, 2003, 10(1): 65-67.

[37] 海龙, 王平, 张仁陟, 王玲英, 张春红, 韩国君. 不同耕作方式对土壤有机磷形态的影响. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(5): 95-99.

[38] Tipping E, Woof C, Rigg E, Harrison A F, Ineson P, Taylor K, Benham D, Poskitt J, Rowland A P, Bol R. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. Environment International, 1999, 25(1): 83-95.

[39] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant and soil, 2001, 237(2): 173-195.

[40] Frizano J, Johnson A H, Vann D R, Scatena F N. Soil phosphorus fractionation during forest development on landslide scars in the Luquillo Mountains, puerto rico. Biotropica, 2002, 34(1): 17-26.