



青海省森林土壤磷储量及其分布格局

唐立涛 刘 丹 罗雪萍 胡 雷 王长庭*

西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

摘 要 磷(P)是地球生态系统中重要的生命元素。全球变化背景下, 科学地探究森林土壤磷储量现状及其影响因子, 对陆地生态系统的稳定以及磷的可持续利用具有重要意义。因此, 该研究利用青海省240个森林标准样地土壤实测数据, 并结合青海省森林资源清查资料估算出了青海省森林土壤磷储量, 揭示了其分布格局, 并讨论了土壤磷储量与环境因子的关系。结果表明: (1)青海省森林土壤磷储量为1.74 Tg, 全省1 m深土壤平均磷密度为 $4.65 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤磷密度总体上呈地带性分布。(2)土壤磷密度在中低海拔(2 200–3 000 m)区域随海拔的升高显著减小, 在高海拔(3 300–3 900 m)区域随海拔高度的增加而显著变大。山地灰褐色森林土的磷密度最大且显著大于山地棕色暗针叶林土和山地暗褐土。(3)土壤磷含量随海拔升高显著减小, 山地棕色暗针叶林土各土层磷含量相对较大, 山地暗褐土的磷含量最小, 且土壤磷含量随着土层的加深而减小。(4)海拔、温度、土壤类型以及土壤含水量均对土壤磷含量有直接影响, 且影响较大, 其中海拔和温度是影响土壤磷含量变化的关键因子; 土壤磷密度对土壤容重、土壤磷含量、土壤含水量、海拔、土壤类型的变化响应较为明显, 而土壤容重可能是限制土壤磷密度变化的主导因素。

关键词 磷储量; 森林土壤; 空间分布; 环境因子; 青海

唐立涛, 刘丹, 罗雪萍, 胡雷, 王长庭 (2019). 青海省森林土壤磷储量及其分布格局. 植物生态学报, 43, 1091–1103. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0194

Forest soil phosphorus stocks and distribution patterns in Qinghai, China

TANG Li-Tao, LIU Dan, LUO Xue-Ping, HU Lei, and WANG Chang-Ting*

Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

Abstract

Aims Our objectives were to investigate the soil phosphorus (P) stocks and distribution patterns in forests of Qinghai Province, and to determine the relationships between soil phosphorus stocks and environmental factors.

Methods Phosphorus stocks in forest soils of Qinghai Province were estimated from measurement data of 240 standard sampling plots in combination with the forest type information in the Qinghai Forest Resources Inventory data. The distribution patterns were examined by spatial analysis.

Important findings Forest soil P stocks in Qinghai Province is estimated at 1.74 Tg. The average soil P density to 1 m depth is about $4.65 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, displaying of pattern of zonal distribution. Soil P density significantly decreases first and then increases with altitude, and is largest in Cinnamon forest soils and less in brown forest soils and dark cinnamon forest soils. Soil P content decreases significantly with altitude. The P content was highest in brown forest soils and lowest in dark cinnamon soils. Total P in the soil profile exhibited characteristics of surface accumulation. The structure equation model (SEM) shows that soil type, altitude, temperature, and soil moisture content have direct impacts on soil P content, with temperature and altitude being among the key factors. Soil P content, altitude, soil moisture content, soil depth, and soil bulk density all have significant effects on soil P density, with soil bulk density being the most prominent factor.

Key words phosphorus stocks; forest soil; spatial distribution pattern; environmental factor; Qinghai

Tang LT, Liu D, Luo XP, Hu L, Wang CT (2019). Forest soil phosphorus stocks and distribution patterns in Qinghai, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 1091–1103. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0194

收稿日期Received: 2019-08-05 接受日期Accepted: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(31870407和31370542)、中央高校基本科研业务费专项基金(2020NZD03)和四川省科技计划重点研发项目(2018SZ033)。Supported by the National Natural Science Foundation (31870407 and 31370542), the Special Fund Project for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (2020NZD03), and the Sichuan Science and Technology Plan to focus on Research and Development Project (2018SZ033).

* 通信作者Corresponding author (wangct6@163.com; wangct@swun.edu.cn)

磷是生态系统中重要的生命元素,是地球上所有生命化学组成的基础之一(Vincent *et al.*, 2012)。植物生长所必需的磷主要来源于土壤,土壤是陆地生态系统中最大的磷库。土壤磷储量主要依靠矿石的风化和大气干湿沉降来维持(Ruttenberg, 2003)。气候、地形地貌、土壤发育阶段、微生物动态等均在生态系统土壤磷库的输入与输出过程中扮演着重要角色(Ippolito *et al.*, 2010)。而土壤的生物化学过程以及植物自身的遗传特性则会影响土壤和植被之间的磷转移(Wei *et al.*, 2010)。磷的通量几乎是单向的,从陆地生态系统逐渐向江河海洋移动(Liu *et al.*, 2008)。19世纪中叶以来,全球变化显著地改变了陆地磷动态。陆地磷库对气候变暖响应敏感,气候变暖使得土壤沙含量增加,进而降低土壤原生矿物磷和有机磷库,土壤总磷减少(Hou *et al.*, 2018)。高降水波动引发森林土壤磷减少(Yuan *et al.*, 2017),氮沉降加速了森林土壤磷循环致使土壤总磷相对减少(Marklein & Houlton, 2011)。

森林约覆盖着地球陆地面积的30% (Fahey *et al.*, 2010), 却占有全球陆地生态系统地上碳库的80%以及地下碳库的40% (FAO, 2005), 并在减缓全球气候变暖、维持碳平衡等方面意义重大。全球变化背景下,人类活动加剧了森林生态系统土壤磷库的供需失衡(Smil, 2000)。采伐、火烧、土地利用变化等人为干扰是森林环境变化的根本原因之一(Baeten *et al.*, 2011), 直接导致森林土壤养分出现增减效应,对土壤磷状态产生持续的影响(Dambrine *et al.*, 2007)。考虑到全球陆地生态系统的磷限制(Augusto *et al.*, 2017), 评估森林土壤磷储量现状及其影响因子,有助于了解森林生态系统如何对全球变化作出响应,利于加快将磷循环纳入地球系统模型的进程(Reed *et al.*, 2015), 对陆地生态系统的稳定以及磷的可持续利用意义深远。

近年来,不少国内外学者研究评价了土壤碳、氮库(Allen *et al.*, 2013), 但针对土壤磷库的估算报道不多(汪涛等, 2008), 并且主要集中于全球和国家尺度。Smil (2000)研究估算了全球农业土壤磷储量为5–6 Pg。Zhang等(2005)对中国表层(0–50 cm)土壤磷储量进行了估算,结果表明中国土壤磷储量为3.5 Pg。郭焱培等(2017)研究结果显示中国北方灌丛1 m深土壤磷储量约为124.6 Tg。然而,区域尺度上对土

壤磷储量的定量评价还存在明显不足,为了减少研究资料不足带来的土壤磷库估算的不确定性,有必要对代表性地区的土壤磷储量和磷密度进行更加准确地评估(Zhang *et al.*, 2005)。青藏高原是全球气候变暖的“启动器”和“放大器”,青海省作为青藏高原的重要组成部分,其森林生态系统在固碳制氧、涵养水源、保育土壤以及生物多样性保护等方面价值巨大,具有极其重要的生态地位。同时也为研究森林土壤磷对全球变化的响应提供了理想的研究场所。然而目前关于青海省森林土壤磷储量的研究却鲜有报道。因此,本研究在统一的取样标准下,对青海省森林土壤磷进行了系统的实地调查,准确估算出了青海省森林土壤磷密度和磷储量并探究了土壤磷变化的限制因素,拟回答以下科学问题: 1)青海省森林土壤磷储量及其空间分布; 2)不同海拔和不同土壤类型磷的变化特征; 3)土壤磷与环境因子间的关系。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

青海省地处青藏高原的东北部,是澜沧江、长江、黄河的发源地。青海省东西长约1 200 km,南北宽达800 km,全境土地面积 $72.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全省林地面积 $756.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占土地总面积的10.5%,其中森林面积为 $64.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。以寒温带针叶林为主,且多分布于海拔2 000–4 000 m区域。青海地处中纬度地带,境内地形差异显著,气候独特,是典型的高原大陆性气候,年降水量16.7–776.1 mm,年平均气温–3.7–6.0 °C,年蒸发量大部分在1 500 mm以上(字洪标等, 2017)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与采样

本研究遵循生态系统固碳项目技术规范编写组(2015)制定的统一要求,并参考青海省森林资源连续清查结果,在青海省21个县内分别选取环境条件(如坡度、坡向、郁闭度等)相似且具有代表性的落叶阔叶林和寒温带针叶林(图1),充分考虑全省各森林类型(优势种)分布面积、蓄积比重、起源等情况,设置80个主要林分类型标准样点。每个样点设置3个50 m × 20 m的样地,样地之间距离大于100 m,总计样地240个。在每个样地沿着对角线设置3个1 m × 1 m的调查样方,共计720个。在每个样方内

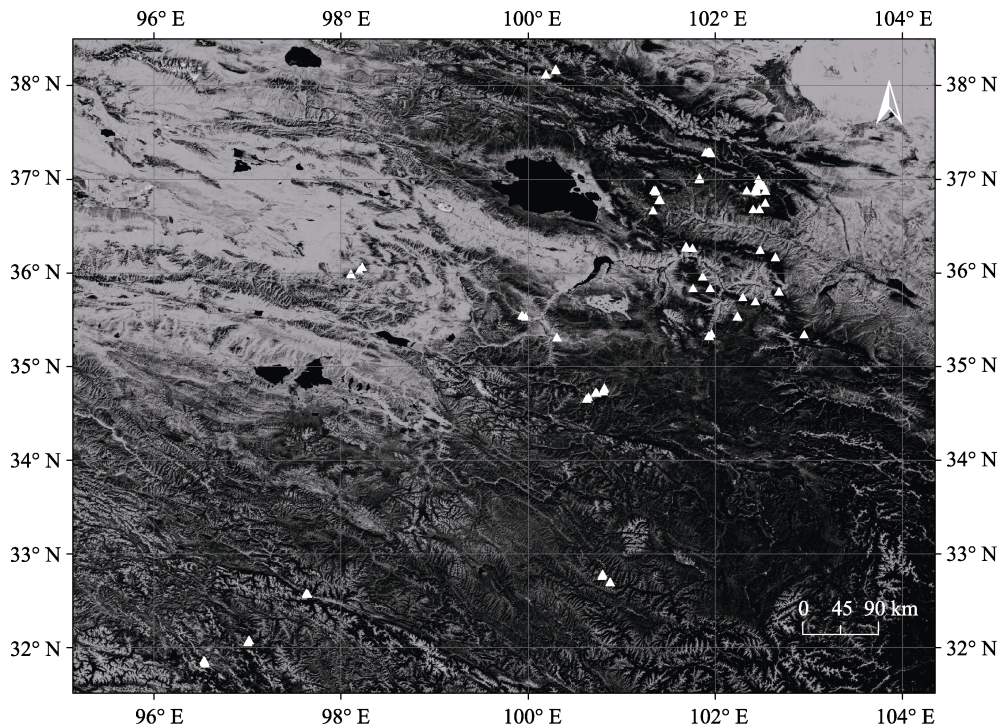


图1 青海省森林土壤样点分布图。
Fig. 1 Distribution of sampling sites of forest soil in Qinghai Province.

表1 青海省样地基本信息表
Table 1 Basic information of sampling sites of forest soil in Qinghai Province

森林类型 Forest type	采样区域 Sample area	优势树 Dominants species	样地数 Number of plots	土壤类型 Soil type	海拔 Altitude (m)
阔叶林 Broadleaf forest	循化、互助、民和、同仁、湟源、湟中、大通、门源、同德、化隆、兴海、Xunhua, Huzhu, Minhe, Tongren, Huangyuan, Huangzhong, Datong, Menyuan, Tongde, Hualong, Xinghai	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	35	山地褐色针叶林土、山地灰褐色森林土、山地暗褐色森林土、山地暗褐色森林土	2 200–3 000
		毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	13	Cinnamon coniferous forest soil, gray cinnamon forest soil, dark cinnamon forest soil	
		红桦 <i>Betula albosinensis</i>	5		
		青杨 <i>Populus cathayana</i>	3		
		山杨 <i>Populus davidiana</i>	9		
针叶林 Coniferous forest	乐都、贵德、互助、门源、化隆、湟中、尖扎、同仁、祁连、玛沁、班玛、同德、玉树、囊谦、大通、都兰、循化、江西林场、Ledu, Guide, Huzhu, Menyuan, Hualong, Huangzhong, Jianzha, Tongren, Qilian, Maqin, Baima, Tongde, Yushu, Nangqien, Datong, Dulan, Xunhua, Jiangxi Forest Farm	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	130	山地褐色针叶林土、山地灰褐色森林土、山地棕色暗针叶林土、山地暗褐色森林土	2 100–3 900
		青扦 <i>Picea wilsonii</i>	9		
		圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	33	Cinnamon coniferous forest soil, gray cinnamon forest soil, brown forest soil, dark cinnamon forest soil	
		落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	3		

(1 m × 1 m)使用内径≥5 cm的土钻, 按0–10、10–20、20–30、30–50、50–100 cm (不够100 cm至母质层为止), 每层随机钻取3钻土, 同一样方同一土层的土样混合成一个土壤样品。野外采回的土样先剔除土壤以外的侵入体(如植物残根、昆虫尸体和石块等)和新生体(如铁锰结合和石灰结合等), 尽快风干后并用木棍压碎。压碎土样先过10目(2 mm孔筛)再以四分法取适量样品磨细过100目(0.15 mm孔筛), 供测定全磷含量使用。

在样地内选择一个未受人为扰动, 植被结构和土壤具有代表性的地段, 挖100 cm深土壤剖面(不足100 cm深的挖至母质层)。沿剖面0–10、10–20、20–30、30–50、50–100 cm分层, 使用容积100 cm³的环刀采集各层土壤, 每层重复2次, 以供测定土壤容重和土壤含水量。

1.2.2 土样测定

土壤全磷含量测定采用NaOH碱熔-钼锑抗比色法(Hu *et al.*, 2016)。野外测定环刀+鲜土质量, 实验

室内测定环刀+干土质量以及环刀质量(环刀样品 105 ℃下烘干至恒质量), 计算土壤容重以及土壤含水量。

1.2.3 其余数据来源

土壤磷化学性质相对稳定, 因而本研究采用年平均气温和平均年降水量探究其对土壤磷库的影响, 数据均来自中国气象数据共享网(中国气象数据网 <https://data.cma.cn/>)。青海省森林土壤类型划分标准参照《青海森林》(青海森林编委会, 1993)和《青海土壤》(青海省农业资源区划办公室, 1997)。砾石含量数据来自《中国森林生态系统碳储量——动态及机制》(王万同等, 2018)。

1.2.4 数据处理计算

根据土壤碳密度的计算公式(郭焱培等, 2017), 本研究磷密度计算公式如下:

$$SPD = \sum (1 - g_i) \times \rho_i \times TP_i \times T_i \quad (1)$$

式中, SPD 为土壤磷密度, g_i 为第*i*层土壤的砾石含量, ρ_i 为第*i*土层的容重, TP_i 为第*i*土层的全磷含量, T_i 为第*i*层土层厚度。各个林分的分布面积乘以林分磷密度再相加即得青海省磷储量。采用SPSS 10.0统计软件进行单因素方差分析, 检验不同土壤类型间磷含量和密度的差异性, 如果方差为齐性, 采用最小显著差异法进行多重比较, 若方差为非齐性, 则用Tamhane's T2法进行多重比较(Zheng & Shangguan, 2007), 使用SPSS 10.0对土壤磷含量和磷密度与海拔之间的关系进行线性回归分析; 利用AMOS 17.0组建土壤磷含量、磷密度和环境因子的结构方程模型; 采用Arcgis 10.0地理统计分析软件对青海省土壤磷密度进行地理空间分析。使用Origin 8.5软件进行数据计算和图表绘制。

表2 青海省森林磷储量
Table 2 Phosphorus stocks in forest of Qinghai Province

林型 Forest type		面积 Area (100 hm ²)	磷储量 Phosphorus stock (Mg)					
			0–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–50 cm	50–100 cm	合计 Total
阔叶林 Broadleaved forest	桦木 <i>Betula</i>	606	19 392	20 604	25 452	59 664	177 558	302 670
	杨树 <i>Populus</i>	404	15 352	15 756	19 796	42 420	113 524	206 848
针叶林 Coniferous forest	青扦 <i>Picea wilsonii</i>	56	2 296	2 632	3 472	8 624	15 232	32 256
	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	72	3 168	3 672	3 888	11 232	21 960	43 920
	柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1 383	58 086	60 852	70 533	142 449	330 537	662 457
	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	982	33 388	40 262	50 082	102 128	264 158	490 018
总计 Total		3 503	131 682	143 778	173 223	366 517	922 969	1 738 169

表3 青海省森林土壤磷密度分配
Table 3 Forest soil phosphorus density distribution in Qinghai Province

林型 Forest type		面积 Area (100 hm ²)	磷密度 Phosphors density (Mg·hm ⁻²)					
			0–10 cm	10–20 cm	20–30 cm	30–50 cm	50–100 cm	0–100 cm
阔叶林 Broadleaved forest	桦木 <i>Betula</i>	606	0.32 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.42 ± 0.03	0.94 ± 0.06	2.93 ± 0.24	4.71
	杨树 <i>Populus</i>	404	0.38 ± 0.02	0.39 ± 0.02	0.49 ± 0.03	1.05 ± 0.08	2.81 ± 0.20	4.62
	平均值 Mean		0.37	0.35	0.46	1.03	2.86	4.68
针叶林 Coniferous forest	青扦 <i>Picea wilsonii</i>	56	0.41 ± 0.05	0.47 ± 0.11	0.62 ± 0.13	1.54 ± 0.33	2.72 ± 0.31	5.76
	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	72	0.44 ± 0.07	0.51 ± 0.05	0.54 ± 0.09	1.56 ± 0.01	3.05 ± 0.04	6.09
	柏木 <i>Cupressus funebris</i>	1 383	0.42 ± 0.03	0.44 ± 0.02	0.50 ± 0.03	1.03 ± 0.05	2.39 ± 0.12	4.50
	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	982	0.31 ± 0.02	0.41 ± 0.02	0.51 ± 0.02	1.04 ± 0.04	2.69 ± 0.10	4.48
	平均值 Mean		0.34	0.42	0.52	1.06	2.59	4.58
平均值 Mean			0.35	0.40	0.50	1.05	2.66	4.65

2 结果和分析

2.1 青海省森林土壤磷储量及磷密度空间分布

由表2可知, 青海省森林土壤磷储量为1.74 Tg。6种林分土壤磷储量之间差异较大, 介于32 256–662 457 Mg之间。各个林分土壤磷储量从大到小的顺序为: 柏木林>云杉林>桦木林>杨树林>落叶松林>青扦林。青海省针叶林土壤磷储量远大于阔叶林, 且占到青海省森林土壤磷总储量的71%。

不同林分土壤磷密度介于4.48–6.09 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间(表3)。各林分土壤磷密度大小为: 落叶松林>青扦林>桦木林>杨树林>柏木林>云杉林。阔叶林土壤磷密度大于针叶林。

1 m深土壤平均磷密度为4.65 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且空间分布差异较大, 总体上呈地带性分布, 即随着经纬度的增加而变大(图2)。0–30 cm土层中(30–50 cm和50–100 cm土层厚度不一样故不加比较), 呈现出随着土层的加深土壤磷密度逐渐变大的垂直分布规律(图3)。20–30 cm土层土壤磷密度显著大于0–10 cm土层($p < 0.05$)。

2.2 不同海拔土壤磷变异特征

0–10、10–20、20–30和30–50 cm土壤磷含量在海拔2 200–3 000 m和3 300–3 900 m均与海拔呈显著负相关关系, 并且3 300 m处土壤磷含量较大(海拔3 000–3 300 m之间样本量稀少不予描述)。50–100 cm土层土壤磷含量在海拔2 200–3 000 m随着海拔增加而显著减少($p < 0.001$), 在3 300–3 900 m随着海拔递增(图4)。

由图5可知, 海拔2 200–3 000 m之间1 m深土壤

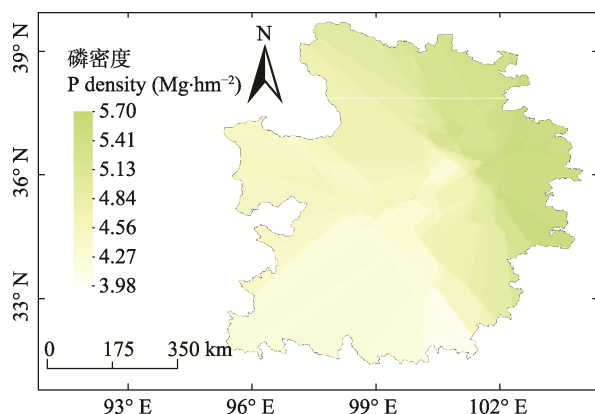


图2 青海省森林土壤磷密度空间分布格局。

Fig. 2 Spatial distribution patterns of forest soil phosphorus density in Qinghai Province.

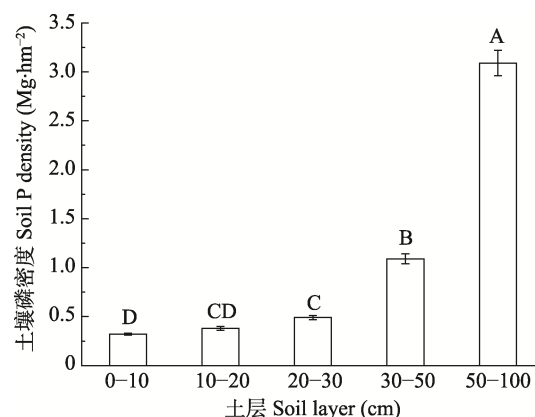


图3 不同土层土壤磷密度(平均值±标准误差)。不同大写字母表示不同土层土壤磷密度差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Phosphorus density of different soil layers (mean \pm SE). Different uppercase letters indicate significant differences in soil phosphorus density between soil layers ($p < 0.05$).

磷密度与海拔呈现极显著负相关关系($p < 0.001$), 在3 300–3 900 m呈极显著的正相关关系($p < 0.001$)。

2.3 不同土壤类型土壤磷变异特征

相同土壤类型不同土层中, 土壤磷含量均呈现出随着土层的加深而变小的垂直分布规律, 此外0–10 cm土层磷含量均显著大于50–100 cm ($p < 0.05$)(图6)。

相同土层不同土壤类型之间, 土层0–10 cm中, 山地棕色暗针叶林土的磷含量显著高于其他土壤类型磷含量($p < 0.05$), 其他3种土壤类型磷含量之间差异不显著。10–20 cm土层中, 山地棕色暗针叶林土的磷含量显著大于山地灰褐色森林土和山地暗褐土($p < 0.05$)。20–30 cm土层磷含量表现出和0–10 cm一样的规律。30–50 cm土层中, 山地棕色暗针叶林土的磷含量也显著大于其他土壤磷含量($p < 0.05$)。土层50–100 cm中, 山地褐色针叶林土磷含量显著小于其他3种土壤类型($p < 0.05$)。

不同土壤类型之间磷密度差异明显(图7), 其中山地灰褐色森林土磷密度最大且显著大于山地棕色暗针叶林土和山地暗褐土($p < 0.05$), 山地暗褐土土壤磷密度最小。

2.4 磷与影响因子的相互关系分析

用结构方程模型(SEM)分析磷含量、磷密度以及环境因子之间的相互影响关系, 各因子的模型适配度良好(图8)。SEM对磷含量、磷密度、降水量、温度、土壤类型、含水量以及容重的解释率分别为21%、69%、2%、39%、6%、46%和46%。海拔、土

层、温度均与磷含量呈极显著负相关关系($p < 0.001$), 含水量与磷含量极显著正相关($p < 0.001$), 同时土壤类型对磷含量的直接影响也达到极显著水平($p < 0.001$), 降水量则通过土壤类型和温度对磷含量产生间接影响。容重通过含水量间接对磷含量产生影

响。其中, 海拔和温度对磷含量的直接影响较大。

分析路径还表明, 磷密度与土层、容重、磷含量极显著正相关($p < 0.001$), 含水量与磷密度极显著负相关($p < 0.001$)。海拔和温度通过影响含水量、容重以及磷含量间接对磷密度产生影响。

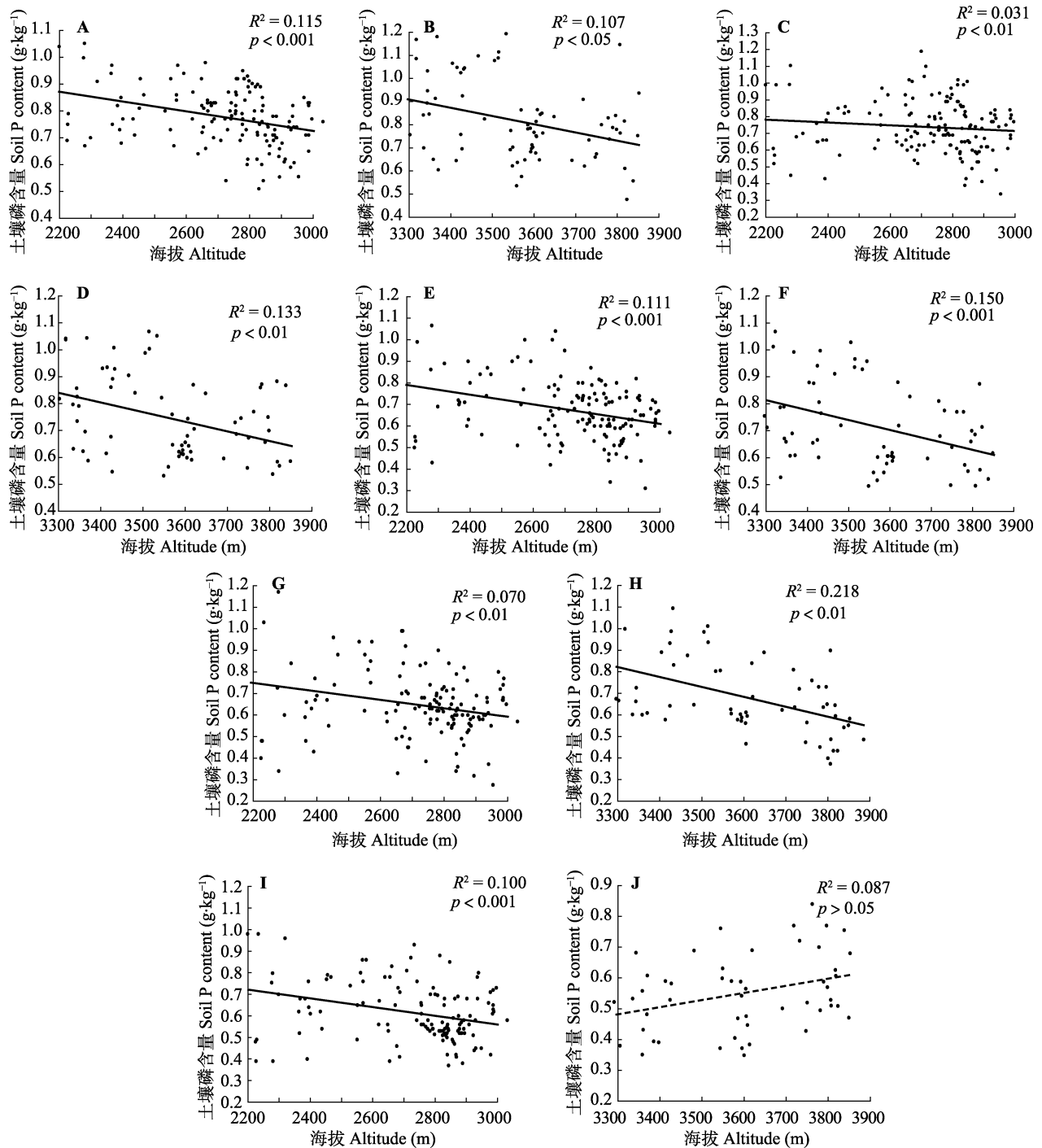


图4 青海省森林土壤磷含量与海拔的关系。A, B, 0–10 cm; C, D, 10–20 cm; E, F, 20–30 cm; G, H, 30–50 cm; I, J, 50–100 cm。实线, $p < 0.05$; 虚线, $p > 0.05$ 。

Fig. 4 Relationships between forest soil phosphorus content and altitude in Qinghai Province. A, B, 0–10 cm; C, D, 10–20 cm; E, F, 20–30 cm; G, H, 30–50 cm; I, J, 50–100 cm. Solid line, $p < 0.05$; dotted line, $p > 0.05$.

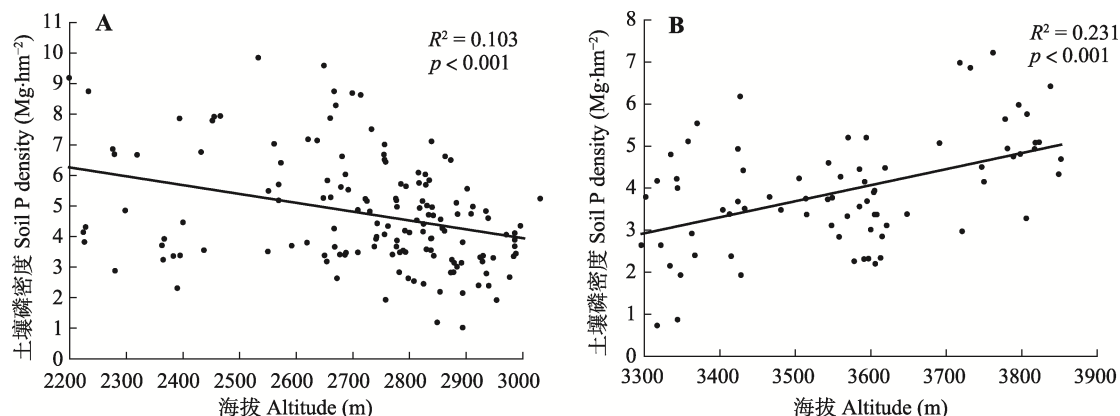


图5 青海省森林土壤磷密度随海拔的变化特征。

Fig. 5 Changes in soil phosphorus density with altitude in Qinghai Province.

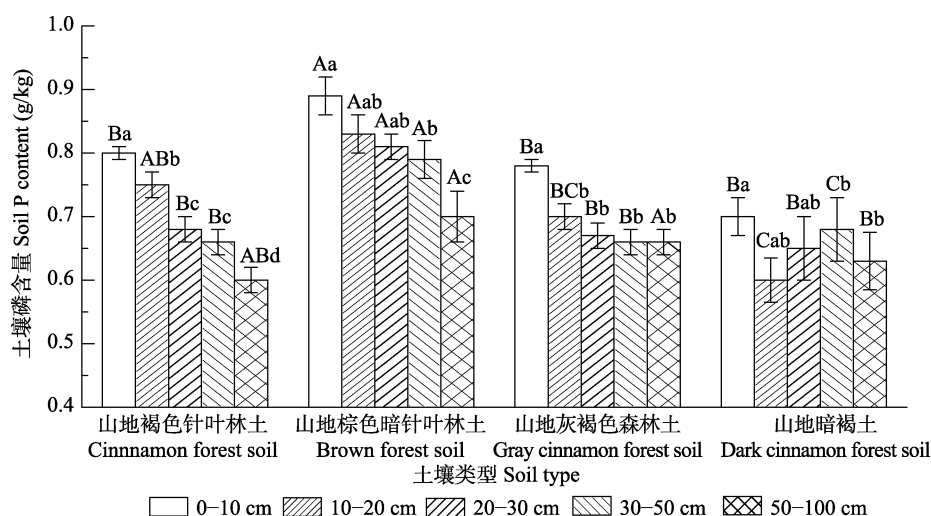


图6 青海省森林不同土壤类型土壤磷含量(平均值±标准误差)。不同大写字母表示相同土层不同土壤类型间的土壤磷含量差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同土壤类型不同土层间土壤磷含量差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 6 Soil phosphorus content in different soil types of forests in Qinghai Province (mean \pm SE). Different uppercase letters indicate significant differences in soil phosphorus content between different soil types in the same soil layer ($p < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences in soil phosphorus content between different soil layers of the same soil type ($p < 0.05$).

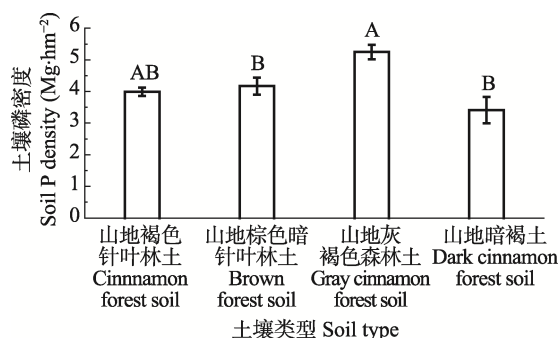


图7 不同土壤类型0-100 cm土壤磷密度(平均值±标准误差)。不同大写字母表示不同土壤类型间土壤磷密度差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 7 Soil phosphorus density in the 0-100 cm soil layer of different soil types (mean \pm SE). Different uppercase letters indicate significant differences in soil phosphorus density between different soil types ($p < 0.05$).

3 讨论

3.1 青海省森林土壤磷储量及其空间分布

土壤全磷表征土壤各种形态磷的总和,是判断磷营养水平的重要指标(Ahern & MacNish, 1983)。较之以往收集整理资料的研究,本研究通过野外实测和室内分析,得到的估算结果准确性相对较高。即青海森林土壤磷储量为1.74 Tg,总体较低。青海近84%的省域面积在海拔3 000 m以上,气候多寒旱,大部分地方失去了能够维持森林生存的基本条件(青海森林编委会, 1993),森林覆盖率处于全国末位水平(仅高于新疆),加之青海省土壤本就磷缺乏,所以青海省森林土壤磷储量总体较低。青海省森林

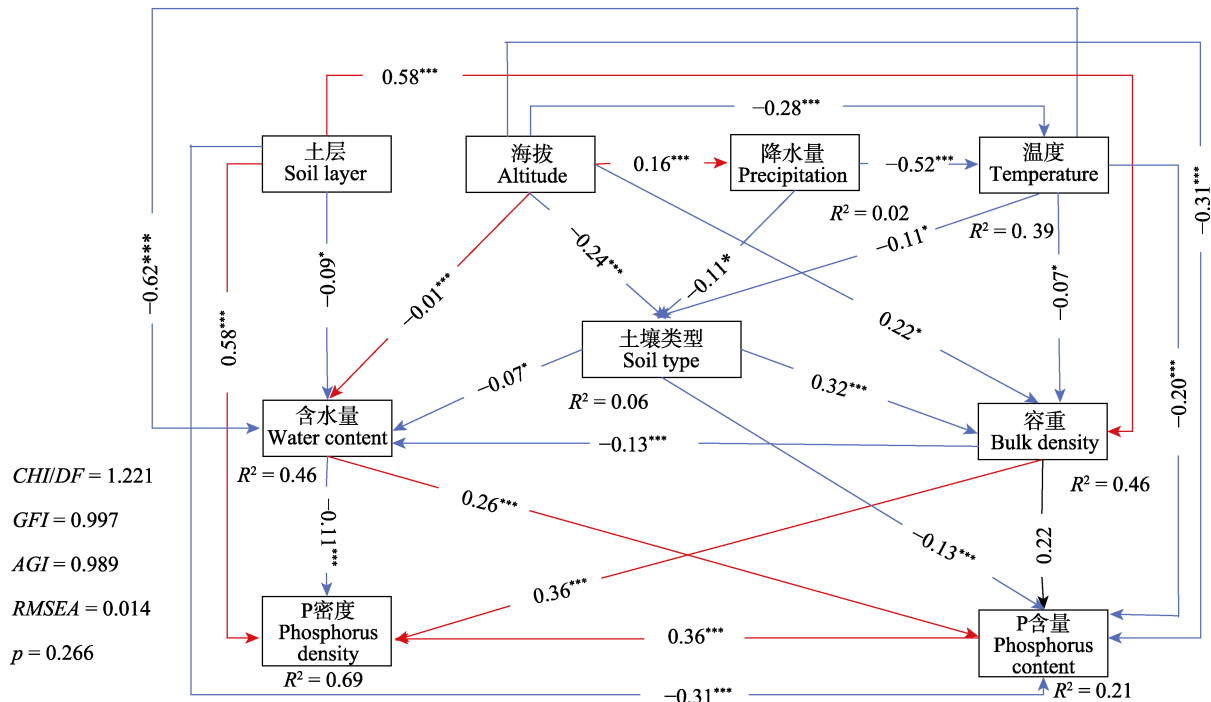


图8 土壤磷与环境因子之间的关系。红线代表正相关, 蓝线代表负相关, 虚线代表相关性不显著。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。AGFI, 调整后适配度指数; CHI, 卡方值; DF, 自由度; GFI, 适配度指数; RMSEA, 近似误差均方根。

Fig. 8 Relationships between soil phosphorus and environmental factors. The red line represents a positive correlation, the blue line a negative correlation, and the dotted line an insignificant correlation. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$. AGFI, adjusted goodness-of-fit index; CHI, Chi-Square; DF, degrees of freedom; GFI, goodness-of-fit index; RMSEA, root mean square error of approximation.

土壤(1 m)平均磷密度为 $4.65 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与郭焱培等(2017)估算出的中国北方灌丛土壤磷密度相差不大, 但低于汪涛等(2008)研究得出的中国表层土壤全磷密度 $6.0 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这可能是由于土壤磷的分布具有较大的空间异质性(Bai *et al.*, 2010), 以及本研究的土壤取样深度和区域尺度都与汪涛等人的研究有所不同所导致。青海省森林土壤磷密度呈地带性空间分布, 总体上随着经纬度增大而增加, 且多集中于东北部, 自然植被分布自东向西依次为森林-草甸-草原-荒漠(青海森林编委会, 1993)。

青海省针叶林土壤磷储量远大于阔叶林, 占森林土壤磷总储量的比例为71%。因为青海省森林以寒温带针叶林为主, 其乔木林面积中, 针叶林占64.2%, 阔叶林仅占27.1%。但阔叶林土壤磷密度大于针叶林, 说明阔叶林下土壤汇集磷的能力强于针叶林(张泰东等, 2017)。研究所在区域针叶林凋落物磷含量小于阔叶林(王鑫等, 2019), 加之针叶林凋落物本身较难分解(Prescott *et al.*, 2000a), 所以针叶林凋落物向土壤归还的磷较少。针叶林凋落物会使土壤pH降低, 土壤pH降低致使无机磷与铝络合

(Carrino-Kyker *et al.*, 2016), 从而减少土壤中磷的固定。此外, 阔叶林多为内生菌根树种, 内生菌根分泌大量可使有机质释放磷的酶, 有助于土壤中磷的积累(Chapin III *et al.*, 2002)。

土壤磷含量在土壤剖面上随土层加深而增大, 与Cassagne等(2000)的研究结果一致。土壤磷的这种垂直分布格局是地球化学过程和动植物活动共同作用的结果, 但植物对土壤磷的垂直分层控制可能更强(周俊等, 2016)。植物生长对磷的需求较大, 上层土壤中的磷或许不能满足植物生长所需, 需要从底层土壤中获取磷, 并随着植物组织的死亡分解, 土壤磷在表层土壤积聚(Viscarra Rossel & Bui, 2016), 所以上层土壤TP含量高于下层。Jobbágy和Jackson(2004)把这种模式解释为在土壤磷迁移的过程中, 植物的“泵吸作用”大于淋滤等地球化学作用。另一个原因是植物地下生物量大多呈“倒金字塔”式分布。这样的垂直分布结构影响植物地下生物量以根系分泌物的形式向土壤输送磷(Vogt *et al.*, 1986)。土壤有机质含量随土层的加深而降低也是导致土壤磷沿剖面减少的一个原因(Khitrov *et al.*, 2018)。

3.2 青海省森林土壤磷含量的影响因素

森林土壤磷循环是陆地生态系统磷循环的重要组成部分, 短期内森林土壤磷输入主要依靠植物凋落物分解以及有机质矿化, 土壤磷输出主要体现在植物生长对磷的吸收和土壤可溶性磷的流失(陈美领等, 2016)。借助SEM分析, 海拔和温度可能是土壤磷含量的主控因子之一。海拔梯度是研究生态系统特性和过程如何随海拔变化的有力工具(Fukami & Wardle, 2005), 其空间尺度更大, 为探索土壤磷对环境因子的响应提供了极好的条件。本研究在中低海拔以及高海拔区域, 各土层(高海拔50–100 cm土层除外)土壤磷含量均随着海拔的增加显著降低。Vincent等(2014)在北极不同海拔磷的研究中也发现相似规律。分析原因: 1)现阶段青藏高原正在加剧的氮沉降通过影响土壤理化性质而干扰土壤磷循环(Vitousek *et al.*, 2010)。王艳丽等(2019)研究发现青海省森林土壤氮含量随着海拔的上升而增加。为了平衡系统中氮输入的增加, 植物需从土壤中吸收更多的磷, 来满足森林高生产力的需求(陈美领等, 2016)。2)温度-植物生理假说认为, 植物体RNA和内酶参与植物生理生化反应, 受到高海拔低温的影响, 其活性降低导致植物生理生化反应迟缓(Reich & Oleksyn, 2004), 植物为了维持正常的生理代谢以及生长需求, 采取吸收大量磷的生长对策来抵抗低温对代谢反应产生抑制作用(刘倩等, 2017), 因此海拔越高土壤磷含量越低; 3)中低海拔分布着针叶林和阔叶林, 王鑫等(2019)认为阔叶林凋落物的磷含量大于针叶林, 且其较针叶林更加容易分解, 致使较多磷回归土壤, 但随着海拔升高, 阔叶林逐渐消失, 导致中低海拔区域土壤磷含量随海拔升高而降低。随着海拔的进一步升高, 针叶林凋落物磷含量逐渐降低, 其向土壤归还磷的量也减少。

高海拔区域50–100 cm土层磷含量随海拔升高有增加的趋势。因为一定范围内随着海拔升高风力变大, 有效积温降低, 植物为了应对高海拔严酷的生存环境, 调整生存对策即增加地下根系生物量(死根相对较多)来维持土壤局部小环境温度(唐立涛等, 2019), 加之根系分解是向土壤归还磷的重要途径(Vogt *et al.*, 1986)。此外, 高海拔区域冻融作用变大, 使得土壤的吸附位点增多, 土壤对磷的吸附能力增强, 进而土壤对磷的缓冲能力得到加强(Özgül *et al.*, 2012)。同时低温环境下土壤微生物为了维持

自身的生存需要, 可能也会通过固定其生物量中的磷来增加土壤微生物中的磷储量(Moreira *et al.*, 2013)。

温度通过对土壤主要理化性质、植物和土壤微生物活性的直接或间接影响, 促进土壤矿化和风化以及磷的快速固定, 从而改变土壤磷形态和含量(Siebers *et al.*, 2017)。本研究中土壤磷含量与温度显著负相关。因为土壤磷的解吸属于吸热反应, 温度升高使得土壤磷解吸速率增大, 吸附于土壤中的磷酸根态磷更容易解吸下来, 加速磷的解吸过程(Barrow, 1983), 进而加大土壤中磷的流失量。温度升高还通过提高生物或者微生物的活性来增加氧气的消耗使得土壤表面更加容易发生生化反应, 促使更多的磷从磷酸铁盐类化合物中释放出来, 增加磷流失的可能(李志伟等, 2007)。另外, 温度升高还加快了土壤有机质的分解(Wright, 1998), 刺激植物生长, 加大对土壤磷的吸收, 更多的磷从土壤转移到植物中, 加剧了土壤磷流失(Yue *et al.*, 2018)。

此外, 单因素方差分析和SEM还表明土壤类型对土壤磷含量有明显的直接影响, 其中山地棕色暗针叶林土各土层磷含量相对较高。是因为其地表枯枝落叶层较厚且在整个生长季含水量丰富, 腐殖质积聚作用十分强烈(Prescott *et al.*, 2000b), 利于磷归还于土壤。而且山地棕色暗针叶林土根系生物量较多, 腐殖质层较为湿润, 厚度一般为30–40 cm, 为土壤中磷积累营造了良好的场所(青海森林编委会, 1993)。山地棕色暗针叶林土黏粒含量较高, 黏粒的比面积较大, 易于磷酸盐的吸附(Cross & Schlesinger, 2001), 从而其土壤磷含量较高。另外, 山地棕色暗针叶林土中土壤全量矿物有明显的淀积现象, 土壤矿物质的生物累积作用较大, 导致其母质层全磷含量稍高于其他土壤类型(郑远昌等, 1988)。山地暗褐土磷含量最低, 可能因为山地暗褐土为淋溶型土壤, 其大部分表土和心土层土壤风化淋溶系数均比底层土低, 说明土体上层土壤风化淋溶作用较强, 矿质营养元素较易淋失, 加之山地暗褐土剖面粗腐殖质层并不明显, 且土壤略显酸性, 影响有机质释放磷, 进而导致土壤磷含量降低(青海省农业资源区划办公室, 1997)。此外, 研究区山地暗褐土母质层多为红砂岩、片麻岩等多种岩石风化的残积物, 造成其土壤磷来源有限(程欢等, 2018)。

磷对土壤含水量变化的响应过程十分复杂,不同区域磷含量对土壤含水量变化响应过程的研究得到的结论不同,这可能与区域土壤特性差异有关(Gahoonia *et al.*, 1994)。土壤含水量的增减直接改变土壤氧化还原条件进而导致土壤中铁氧化物的形态变化与土壤磷的吸附/解吸过程密切相关(Ma *et al.*, 2010), 吸附解吸量的变化导致土壤磷含量改变。本研究中土壤磷含量与含水量显著正相关。原因是,一定范围内土壤含水量变低,加之青海省地处西北,区域多风且易发生风蚀,风蚀作用吹走大量土壤细粒物质。细粒物质对磷的吸附能力强,且磷含量高,细粒物质的缺失直接削弱土壤对磷的保护作用,进而导致土壤磷减少(Viscarra Rossel & Bui, 2016)。此外,土壤的干燥缺水抑制了土壤微生物和酶的活性,进而影响土壤有机质的分解和积累平衡,不利于对磷的矿化和固定(Frolking *et al.*, 2001),使得磷含量减小。

3.3 青海省土壤磷密度的影响因素

在土壤剖面上,土壤磷密度随土层增大不仅受土壤磷含量的影响,还与计算方法中作为主要参数的土壤容重紧密相关。因为土壤表层疏松,随着土层的加深,土壤团聚性下降,进而容重变大(卢振启等, 2014)。

山地灰褐色森林土磷含量虽然低于山地棕色暗针叶林土,但其土壤磷密度最大。可能是山地灰褐色森林土容重较大导致。山地灰褐色森林土表层以下土体较为紧实,土壤结构由鳞片状过渡为块状结构(青海省农业资源区划办公室, 1997),土壤容重较大。山地暗褐土磷密度最小是由于山地暗褐土不仅土壤磷含量偏低,而且沿土壤剖面绝大部分为轻壤土,容重略小(青海省农业资源区划办公室, 1997)。

不同海拔区域土壤磷密度变化不尽一致。即在海拔2 200–3 000 m间磷密度的递减与土壤磷含量随海拔的变化密切相关;在3 300–3 900 m间磷密度的递增可能是由于土壤容重随海拔上升而变大所致。土壤容重对海拔升高响应明显,表现为随海拔梯度递增。万丹等(2018)的研究也表明在一定海拔范围内土壤容重随海拔升高而变大。因为凋落物量随着海拔升高而减小(王鑫等, 2019),低海拔区域凋落物量较多,其通过向土壤释放养分增加土壤有机质含量而改变土壤理化性状,同时覆盖于地表的凋落物阻止了降水对土壤结构的直接破坏,使得土壤

具有良好的通透性。

4 结论

探究青海省森林土壤磷储量及其空间分布,并分析了土壤磷与环境因子的关系。我们得出以下结论:青海省森林土壤磷储量为1.74 Tg,低于全国平均水平;针叶林土壤磷储量占青海省森林土壤磷总储量的71%,说明针叶林土壤磷储量在青海森林土壤磷库中占有重要位置;土壤磷密度为4.65 Mg·hm⁻²,总体上呈地带性分布,多集中于省域的东北部;土壤磷含量随着土层的加深而减小;海拔、温度、土壤类型及土壤含水量对土壤磷含量的直接影响较大,其中海拔和温度可能是土壤磷含量的主控因子,而土壤磷密度更多的是受土壤容重的影响。总之,在经营和管理森林生态系统时应该考虑到森林土壤磷分布状况及其限制因素,以便制定更合理的森林管理利用策略。

参考文献

- Ahern CR, MacNish SE (1983). Comparative study of phosphorus and potassium levels of basaltic soils associated with scrub and forest communities on the Darling Downs. *Soil Research*, 21, 527–538.
- Allen SK, Plattner GK, Nauels A, Xia Y, Stocker TF (2013). Climate change 2013: The physical science basis. An overview of the working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Computational Geometry*, 18, 95–123.
- Augusto L, Achat DL, Jonard M, Vidal D, Ringeval B (2017). Soil parent material—A major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 23, 3808–3824.
- Baeten L, Verstraeten G, de Frenne P, Vanhellefont M, Wuyts K, Hermy M, Verheyen K (2011). Former land use affects the nitrogen and phosphorus concentrations and biomass of forest herbs. *Plant Ecology*, 212, 901–909.
- Bai JH, Ouyang H, Xiao R, Gao JQ, Gao HF, Cui BS, Huang LB (2010). Spatial variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorus content and storage in an alpine wetland in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Australian Journal of Soil Research*, 48, 730–736.
- Barrow NJ (1983). A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *Journal of Soil Science*, 34, 733–750.
- Carrino-Kyker SR, Kluber LA, Petersen SM, Coyle KP, Hewins CR, DeForest JL, Smemo KA, Burke DJ (2016). Mycorrhizal fungal communities respond to experimental

- elevation of soil pH and P availability in temperate hardwood forests. *FEMS Microbiology Ecology*, 92, fiw024. DOI: 10.1093/femsec/fiw024.
- Cassagne N, Remaury M, Gauquelin T, Fabre A (2000). Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France). *Geoderma*, 95, 161–172.
- Chapin III FS, Matson PA, Mooney HA (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York.
- Chen ML, Chen H, Mao QG, Zhu XM, Mo JM (2016). Effect of nitrogen deposition on the soil phosphorus cycle in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4965–4976. [陈美领, 陈浩, 毛庆功, 朱晓敏, 莫江明 (2016). 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. 生态学报, 36, 4965–4976.]
- Cheng H, Gong YB, Wu Q, Li Y, Liu Y, Zhu DW (2018). Content and ecological stoichiometry characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus of typical soils in sub-alpine/alpine mountain of western Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 33, 161–172. [程欢, 宫渊波, 吴强, 李瑶, 刘颖, 朱德雯 (2018). 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 自然资源学报, 33, 161–172.]
- Compilation Group of Technical Specifications for Ecosystem Carbon Sequestration Project (2015). *Technical Specifications for Observation and Investigation of Ecosystem Carbon Sequestration*. Science Press, Beijing. [生态系统固碳项目技术规范编写组 (2015). 生态系统固碳观测与调查技术规范. 科学出版社, 北京.]
- Cross AF, Schlesinger WH (2001). Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry*, 52, 155–172.
- Dambrine E, Dupouey JL, Laüt L, Humbert L, Thimon M, Beaufils T, Richard H (2007). Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology*, 88, 1430–1439.
- Editorial Committee of Forest in Qinghai (1993). *Forest in Qinghai*. China Forestry Press, Beijing. [青海森林编委会 (1993). 青海森林. 中国林业出版社, 北京.]
- Fahey TJ, Woodbury PB, Battles JJ, Goodale CL, Hamburg SP, Ollinger SV, Woodall CW (2010). Forest carbon storage: Ecology, management, and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 245–252.
- FAO (2005). Global forest resource assessment: Progress towards sustainable forest management. In: FAO ed. *FAO Forestry Paper 147*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Frolking S, Roulet NT, Moore TR, Richard PJH, Lavoie M, Muller SD (2001). Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation. *Ecosystems*, 4, 479–498.
- Fukami T, Wardle DA (2005). Long-term ecological dynamics: Reciprocal insights from natural and anthropogenic gradients. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272, 2105–2115.
- Gahoonia TS, Raza S, Nielsen NE (1994). Phosphorus depletion in the rhizosphere as influenced by soil moisture. *Plant and Soil*, 159, 213–218.
- Guo YP, Yang X, Mohhamot A, Liu HY, Ma WH, Yu SL, Tang ZY (2017). Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate shrubland ecosystems across Northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 14–21. [郭焱培, 杨弦, 安尼瓦尔·买买提, 刘鸿雁, 马文红, 于顺利, 唐志尧 (2017). 中国北方温带灌丛生态系统碳、氮、磷储量. 植物生态学报, 41, 14–21.]
- Hou EQ, Chen CR, Luo YQ, Zhou GY, Kuang YW, Zhang YG, Heenan M, Lu XK, Wen DZ (2018). Effects of climate on soil phosphorus cycle and availability in natural terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 3344–3356.
- Hu L, Xiang ZY, Wang GX, Rafique R, Liu W, Wang CT (2016). Changes in soil physicochemical and microbial properties along elevation gradients in two forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31, 242–253.
- Ippolito JA, Blecker SW, Freeman CL, McCulley RL, Blair JM, Kelly EF (2010). Phosphorus biogeochemistry across a precipitation gradient in grasslands of central North America. *Journal of Arid Environments*, 74, 954–961.
- Jobbágy EG, Jackson RB (2004). The uplift of soil nutrients by plants: Biogeochemical consequences across scales. *Ecology*, 85, 2380–2389.
- Khitrov NB, Zazovskaya EP, Rogovneva LV (2018). Morphology, radiocarbon age, and genesis of Vertisols of the Eisk Peninsula (the Kuban-Azov Lowland). *Eurasian Soil Science*, 51, 731–743.
- Li ZW, Cui LT, Geng SG, Zhang YP (2007). Environmental factors affecting soil phosphorus desorption. *Soil and Water Conservation in China*, (6), 33–34. [李志伟, 崔力拓, 耿世刚, 张艳萍 (2007). 影响土壤磷素解吸的环境因素研究. 中国水土保持, (6), 33–34.]
- Liu Q, Zheng X, Deng BL, Zheng LY, Huang LJ, Wang SL, Zhang L, Guo XM (2017). Effect of altitude on the phosphorus contents of soil and plant litter deposits in a Wugong Mountain meadow. *Pratacultural Science*, 34, 2183–2190. [刘倩, 郑翔, 邓邦良, 郑利亚, 黄立君, 王书丽, 张令, 郭晓敏 (2017). 武功山草甸不同海拔对土壤和植物凋落物磷含量的影响. 草业科学, 34, 2183–2190.]
- Liu Y, Villalba G, Ayres RU, Schroder H (2008). Global phosphorus flows and environmental impacts from a consumption perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12, 229–247.
- Lu ZQ, Huang QX, Yang XB (2014). Research on hydrological effects of forest litters and soil of *Pinus tabulaeformis* plantations in the different altitudes of Wuling Mountains

- in Hebei. *Journal of Soil and Water Conservation*, 28, 112–116. [卢振启, 黄秋娟, 杨新兵 (2014). 河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究. *水土保持学报*, 28, 112–116.]
- Ma LM, Rena D, Zhang M, Zhao JF (2010). Phosphorus fractions and soil release in alternately waterlogged and drained environments at the water-fluctuation-zone of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 8, 1329–1335.
- Marklein AR, Houlton BZ (2011). Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 193, 696–704.
- Moreira A, Moraes LAC, Zaninetti RA, Canizella BT (2013). Phosphorus dynamics in the conversion of a secondary forest into a rubber tree plantation in the Amazon rainforest. *Soil Science*, 178, 618–625.
- Özgül M, Günes A, Esringü A, Turan M (2012). The effects of freeze-and-thaw cycles on phosphorus availability in highland soils in Turkey. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 827–839.
- Prescott CE, Maynard DG, Laiho R (2000b). Humus in northern forests: Friend or foe? *Forest Ecology and Management*, 133, 23–36.
- Prescott CE, Zabek LM, Staley CL, Kabzems R (2000a). Decomposition of broadleaf and needle litter in forests of British Columbia: Influences of litter type, forest type, and litter mixtures. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1742–1750.
- Qinghai Provincial Agricultural Resources Regionalization Office (1997). *The Soil in Qinghai Province*. China Agriculture Press, Beijing. [青海省农业资源区划办公室 (1997). 青海土壤. 中国农业出版社, 北京.]
- Reed SC, Yang XJ, Thornton PE (2015). Incorporating phosphorus cycling into global modeling efforts: A worthwhile, tractable endeavor. *New Phytologist*, 208, 324–329.
- Reich PB, Oleksyn J (2004). Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 11001–11006.
- Ruttenberg KC (2003). The global phosphorus cycle. *Treatise on Geochemistry*, 585–643.
- Siebers N, Sumann M, Kaiser K, Amelung W (2017). Climatic effects on phosphorus fractions of native and cultivated north American grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 299–309.
- Smil V (2000). Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 53–88.
- Tang LT, Zi HB, Hu L, Ade LJ, Wang CT (2019). Forest biomass and its influencing factors in Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 3677–3686. [唐立涛, 字洪标, 胡雷, 阿的鲁骥, 王长庭 (2019). 青海省森林细根生物量及其影响因子. *生态学报*, 39, 3677–3686.]
- Vincent AG, Schleucher J, Gröbner G, Vestergren J, Persson P, Jansson M, Giesler R (2012). Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: The role of iron and aluminium. *Biogeochemistry*, 108, 485–499.
- Vincent AG, Sundqvist MK, Wardle DA, Giesler R (2014). Bioavailable soil phosphorus decreases with increasing elevation in a subarctic tundra landscape. *PLOS ONE*, 9, e92942. DOI: 10.1371/journal.pone.0092942.
- Viscarra Rossel RA, Bui EN (2016). A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. *Science of the Total Environment*, 542, 1040–1049.
- Vitousek PM, Porder S, Houlton BZ, Chadwick OA (2010). Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20, 5–15.
- Vogt KA, Grier CC, Vogt DJ (1986). Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 15, 303–377.
- Wan D, Liang B, Nie XG, Yu W, Zhang B (2018). Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain, Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 1065–1074. [万丹, 梁博, 聂晓刚, 喻武, 张博 (2018). 西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性. *生态学报*, 38, 1065–1074.]
- Wang T, Yang YH, Ma WH (2008). Storage, patterns and environmental controls of soil phosphorus in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44, 945–952. [汪涛, 杨元合, 马文红 (2008). 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. *北京大学学报(自然科学版)*, 44, 945–952.]
- Wang WT, Tang XL, Huang M, Zhou GY, Yin GC, Wang JX, Wen DZ (2018). *Carbon Storage of Forest Ecosystem in China—Dynamics and Mechanisms*. Science Press, Beijing. [王万同, 唐旭利, 黄玫, 周国逸, 尹光彩, 王金霞, 温达志 (2018). 中国森林生态系统碳储量——动态及机制. 科学出版社, 北京.]
- Wang X, Luo XP, Zi HB, Yang WG, Hu L, Wang CT (2019). Ecological stoichiometry characteristics of forest litter and its influencing factors in Qinghai Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 28, 1–14. [王鑫, 罗雪萍, 字洪标, 杨文高, 胡雷, 王长庭 (2019). 青海森林凋落物生态化学计量特征及其影响因子. *草业学报*, 28, 1–14.]
- Wang YL, Zi HB, Cheng RX, Tang LT, Suoer A, Luo XP, Li J, Wang CT (2019). Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 4096–4105. [王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 唐立涛, 所尔阿芝, 罗雪萍, 李洁, 王长庭 (2019). 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征. *生态学报*, 39, 4096–4105.]
- Wei LL, Chen CR, Xu ZH (2010). Citric acid enhances the

- mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 46, 765–769.
- Wright RF (1998). Effect of increased carbon dioxide and temperature on runoff chemistry at a forested catchment in southern Norway (CLIMEX project). *Ecosystems*, 1, 216–225.
- Yuan ZY, Jiao F, Shi XR, Sardans J, Maestre FT, Delgado-Baquerizo M, Reich PB, Peñuelas J (2017). Experimental and observational studies find contrasting responses of soil nutrients to climate change. *eLife*, 6, e23255. DOI: 10.7554/eLife.23255.
- Yue K, Yang WQ, Peng Y, Peng CH, Tan B, Xu ZF, Zhang L, Ni XY, Zhou W, Wu FZ (2018). Individual and combined effects of multiple global change drivers on terrestrial phosphorus pools: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 630, 181–188.
- Zhang C, Tian HQ, Liu JY, Wang SQ, Liu ML, Pan SF, Shi XZ (2005). Pools and distributions of soil phosphorus in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1020. DOI: 10.1029/2004GB002296.
- Zhang TD, Wang CK, Zhang QZ (2017). Vertical variation in stoichiometric relationships of soil carbon, nitrogen and phosphorus in five forest types in the Maoershan region, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3135–3143. [张泰东, 王传宽, 张全智 (2017). 帽儿山5种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化. 应用生态学报, 28, 3135–3143.]
- Zheng SX, Shangguan ZP (2007). Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Trees*, 21, 357–370.
- Zheng YC, Gao SH, Zhong XH (1988). Soil in Siguniang Mountain region and its vertical distribution. *Mountain Research*, 6, 227–234. [郑远昌, 高生淮, 钟祥浩 (1988). 四姑娘山区土壤及其垂直分布. 山地研究, 6, 227–234.]
- Zhou J, Bing HJ, Wu YH, Sun SQ, Luo J (2016). Variations in soil P biogeochemistry and its impact factors along an altitudinal gradient in the Yanzigou, eastern slope of the Gongga Mountain. *Mountain Research*, 34, 385–392. [周俊, 邴海健, 吴艳宏, 孙守琴, 罗辑 (2016). 贡嘎山燕子沟土壤磷海拔梯度特征及影响因素. 山地学报, 34, 385–392.]
- Zi HB, Xiang ZY, Wang GX, Ade LJ, Wang CT (2017). Profile of soil microbial community under different stand types in Qinghai Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(3), 21–32. [字洪标, 向泽宇, 王根绪, 阿的鲁骥, 王长庭 (2017). 青海不同林分土壤微生物群落结构(PLFA). 林业科学, 53(3), 21–32.]

责任编辑: 杜 盛 实习编辑: 赵 航