

网络出版时间:2016-11-24 13:52 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.01.011
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161124.1352.022.html>

辽东山区原始红松林土壤理化性质及其与土壤有机碳的相关性分析

张慧东^{1,2}, 尤文忠², 魏文俊², 周梅¹

(1 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2 辽宁省林业科学研究所, 辽宁 沈阳 110032)

[摘要] 【目的】分析我国辽东山区原始红松林土壤理化性质的空间分布格局,揭示原始红松林土壤有机碳与土壤理化性质的相互关系。【方法】采用剖面法和经典的土壤理化性质测定方法,以辽东山区白石砬子森林生态站原始红松林作为对象,按照原始红松林内红松、其他针叶树种以及阔叶树种组成比例的不同,将其划分为原始红松林 I (6 红松 4 阔叶)、原始红松林 II (3 红松 2 其他针叶 5 阔叶)和原始红松林 III (3 红松 7 阔叶)3 种类型,测定了 3 种原始红松林土壤理化性质的垂直分布特征,并分析红松林土壤有机碳与其他土壤理化性质(土壤体积质量、全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾和 pH 值)的相关性。【结果】不同树种组成的原始红松林的土壤理化性质之间存在明显差异,其中原始红松林 III 土壤的有机碳、全磷和速效磷平均含量最高,原始红松林 I 土壤的全氮和全钾平均含量最高,原始红松林 II 土壤的水解性氮、体积质量和 pH 值平均值最高。不同树种组成的原始红松林土壤有机碳与全氮、水解性氮、全磷、速效磷等 4 个土壤养分因子均呈显著正相关关系,与全钾呈显著负相关关系,其中相关性最高的是土壤全氮。另外,土壤有机碳还与土壤体积质量和 pH 值呈显著负相关关系。【结论】辽东山区不同树种组成的原始红松林土壤理化性质存在明显差异,但均与土壤有机碳表现出较高的相关性。

[关键词] 辽东山区;原始红松林;土壤理化性质;土壤有机碳

[中图分类号] S714.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)01-0076-07

Soil physical and chemical properties and correlation with organic carbon in original Korean pine forest in Eastern Liaoning mountainous area

ZHANG Huidong^{1,2}, YOU Wenzhong², WEI Wenjun², ZHOU Mei¹

(1 Ecology and Environmental College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China;

2 Liaoning Academy of Forestry, Shenyang, Liaoning 110032, China)

Abstract: 【Objective】Spatial distribution of soil physical and chemical properties in original Korean pine forest in Eastern Liaoning mountainous area was analyzed and the relationship with soil organic carbon was investigated. 【Method】Based on the tree species composition, the original Korean pine forests in Eastern Liaoning mountainous area were divided into three forest types, the original Korean pine forest I (containing 60% Korean pine and 40% broadleaved tree), the original Korean pine forest II (containing 30% Korean pine, 20% other coniferous tree, and 50% broadleaved tree), and the original Korean pine forest III (containing 30% Korean pine and 70% broadleaved tree). Profile method and the classic

[收稿日期] 2016-06-17

[基金项目] 国家林业公益性行业科研专项(201204101, 201404303); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014015)

[作者简介] 张慧东(1981—),男,内蒙古呼和浩特人,高级工程师,在读博士,主要从事森林生态学研究。

E-mail: zhanghuidong00@163.com

[通信作者] 周梅(1960—),女(蒙古族),辽宁锦州人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林生态学研究。

E-mail: dxal528@aliyun.com

measurement method of soil physical and chemical properties were used to analyze the vertical distribution characteristics of soil physical and chemical properties and the relationships among soil physical and chemical properties in original Korean pine forests. 【Result】 There were significant differences between soil physical and chemical properties in three original Korean pine forests. Variations of soil physical and chemical properties in these three forests were different. Soil organic carbon, total phosphorus and available phosphorus were the largest for original Korean pine forest Ⅲ, total nitrogen and total potassium were the largest for original Korean pine forest Ⅰ, and hydrolysable nitrogen, bulk density and pH value were the largest for original Korean pine forest Ⅱ. These differences were closely related with tree species composition. Soil organic carbon showed significant positive correlation with soil total nitrogen, hydrolysable nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus, and significant negative correlation with soil total potassium. The total nitrogen had the most relevant relationship with soil organic carbon. Soil organic carbon also had significant negative correlation with soil bulk density and pH value. 【Conclusion】 There were significant differences in soil physical and chemical properties between original Korean pine forests with different species compositions in Eastern Liaoning mountainous area. All soil physical and chemical properties had high correlation with soil organic carbon.

Key words: Eastern Liaoning mountainous area; original Korean pine forest; soil physical and chemical properties; soil organic carbon

全球土壤有机碳库为 1 500~2 000 Pg,约是大气碳库、陆地生物量碳库的 3 倍和 2.5 倍^[1]。中国土壤碳库为 50~180 Pg,约占全球土壤碳库的 1/20^[2-3],土壤有机碳库是陆地生态系统碳储库的重要组成部分,在全球碳循环中起着关键的作用。森林土壤受到土壤结构、根系深度、土层特性、有效水分保持能力、土壤生物多样性等土壤学特征的强烈影响,其 N、P、K、pH 值等特征指标在准确反映生态系统功能变异性、确定森林生态系统中土壤元素变化对土壤 C 循环过程的响应等方面具有重要作用。通过分析森林土壤有机碳与 N、P、K、pH 值的关系,可以反映土壤的肥力状况,同时体现土壤有机质构成和土壤质量状况以及养分的供给能力,反映土壤 C、N、P 矿化、固持等作用^[4]。

辽东山区森林是我国东北森林的重要组成部分,原始红松林是该区内的地带性顶级森林植被类型^[5]。自 20 世纪 50 年代以来,为了满足国家建设对木材的大量需求,原始红松林也不可避免地遭受了前所未有的大规模人为干扰和破坏,在辽宁东部山区已濒临绝迹^[6]。然而,目前已开展的一些研究主要集中在对辽东山区不同天然次生林土壤碳的报道方面^[7],缺乏针对辽东山区顶级群落原始红松林土壤有机碳特征及其与土壤理化性质相关关系的深入研究,在研究区域森林演替、生态恢复等生态过程对森林土壤有机碳的影响方面缺乏科学的数据。本研究以地处长白山最南端边缘地带、天然红松林分

布区西南界的辽东山区白石砬子保存完好的原始红松林为对象,研究不同类型原始红松林土壤有机碳的分布特征,分析土壤有机碳与土壤理化性质(土壤体积质量、全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾和 pH 值)的相关关系,旨在为探索我国东北地区原始红松林土壤理化性质的分布格局及其土壤有机碳对土壤理化性质的响应提供科学依据。

1 研究地概况

研究地点辽宁白石砬子森林生态系统国家定位观测站位于辽宁省丹东市宽甸县境内的辽宁白石砬子国家级自然保护区,地理坐标为 124°44′07″~124°57′30″E,40°50′00″~40°57′12″N,总面积 7 405 hm²,属长白山余脉千山山系。该区属温带大陆性季风气候,冬季受西伯利亚大陆气团控制,夏季受太平洋湿润东南季风影响,冬季比较寒冷,夏季温暖湿润。由于复杂地形和茂密植被的影响,区内气温偏低,湿度偏高,形成典型而独特的山地气候,年平均气温 5.3℃,年平均日照时数 1 841.3 h,年平均降水量 1 349.3 mm,年平均相对湿度 73%。白石砬子植物区系属泛北极植物区中国-日本森林植物亚区东北地区,该区处于长白、华北植物区系交替地带,兼有蒙古区系植物。区内植被垂直分布明显,以海拔 850 m 为界,该海拔以上为针阔混交林和针叶林,林下土壤为山地暗棕色森林土,该海拔以下为阔叶杂木林,林下土壤为山地棕色森林土。

2 研究方法

2.1 样地布设

选择辽东山区白石砬子森林生态站原始红松林作为研究对象,按照各原始红松林林内红松、其他针叶树种以及阔叶树种组成比例的不同,将其划分为原始红松林Ⅰ(6 红松 4 阔叶)、原始红松林Ⅱ(3 红

松 2 其他针叶 5 阔叶)和原始红松林Ⅲ(3 红松 7 阔叶)3 种类型。每种森林类型各设置 3 块 20 m×20 m 标准样地,记录地理坐标、海拔、坡向和坡度等,对乔木进行每木检尺;在每个标准样地内上、中、下坡位置分别设置 3 个 2 m×2 m 的灌木样方,并在每个灌木样方内设置 1 m×1 m 的草本样方,调查灌木和草本的基本概况。标准样地的基本情况见表 1。

表 1 辽东山区原始红松林标准样地的基本情况

Table 1 Information of plots in original Korean pine mixed forest in Eastern Liaoning mountainous area

植被类型 Vegetation type	红松林龄/年 Stand age	海拔/m Altitude	坡向 Slope	郁闭度 Canopy density	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density
原始红松林Ⅰ Original Korean pine forestⅠ	95	845	北 North	0.60	25.4	20.0	425
	120	846	西北 Northwest	0.70	26.6	23.0	750
	120	860	北 North	0.70	25.9	23.0	825
原始红松林Ⅱ Original Korean pine forestⅡ	80	917	东南 Southeast	0.80	23.6	20.0	800
	97	930	东南 Southeast	0.60	20.0	19.4	1 325
	103	937	东南 Southeast	0.70	23.4	21.0	950
原始红松林Ⅲ Original Korean pine forestⅢ	135	1 050	北 North	0.65	25.0	21.0	950
	120	1 048	北 North	0.70	22.0	23.0	650
	150	1 040	西北 Northwest	0.70	25.0	21.0	750

2.2 样品采集及测定方法

在每个标准样地内的上、中、下坡分别挖 3 个土壤剖面,用环刀、铝盒采集 0~10,10~20,20~40,40~60,60~100 cm 土层土样,采用四分法采集各层的混合土样,将其带回实验室,测定土壤自然含水量、体积质量、pH 值、有机碳、全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾等。

利用烘干法测定土壤自然含水量,环刀法测定土壤体积质量,DENVER 酸度计(UB-7)测定 pH 值,KCr₂O₇-浓 H₂SO₄ 外加热法测定土壤有机碳含量,FOSS 全自动凯氏定氮仪(Kjeltec 8400)测定土壤全氮含量,碱解-扩散法测定土壤水解性氮含量,碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量,盐酸和硫酸溶液浸提法测定土壤速效磷含量,碱熔-火焰光度法测定土壤全钾含量。

2.3 数据处理

为整体反映辽东山区原始红松林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关关系,采用 Office excel 2013、SPSS 19.0、Sigmaplot 10.0 等软件,以土壤有机碳含量为因变量(*y*),理化性质因子为自变量(*x*),将 3 种森林类型(原始红松林Ⅰ、原始红松林Ⅱ和原始红松林Ⅲ)的土壤有机碳含量数据与其理化性质(土壤体积质量、全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾和 pH 值)数据综合,进行相关性分析和显著性检验。当达到显著性(*P*<0.05)时,认为二者可能存在直接或者间接的相互影响,否则认为相互间不

存在影响。

3 结果与分析

3.1 辽东山区原始红松林土壤理化性质分布格局

表 2 显示,3 种原始红松林土壤理化性质均随土层深度的增加呈规律性变化,其中土壤有机碳、全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾含量总体均随着土层深度的增加而降低,土壤体积质量总体随着土层深度的增加而增大,pH 值与土壤体积质量的垂直分布规律相似。总体来看,随着土层深度的增加,土壤酸性逐渐减弱,土壤养分含量减少,土壤逐渐变紧实,这与前人的研究结果^[7-11]基本一致。

表 2 还显示,不同土层深度内各个土壤理化性质指标的变化幅度不尽相同。土壤有机碳、全氮和水解性氮 3 个指标在 0~40 cm 土层降低最快,而在 40 cm 以下土层下降趋缓。土壤全磷、速效磷和全钾 3 个指标在 0~20 cm 土层降低最快,20 cm 以下土层下降趋缓。土壤体积质量和 pH 值 2 个指标在 0~20 cm 土层增加最快,20 cm 以下土层升高变缓。

由表 2 还可知,3 种原始红松林土壤理化性质平均值的变化规律为:土壤有机碳、全磷和速效磷含量均以原始红松林Ⅲ最高,全氮和全钾含量均以原始红松林Ⅰ最高,水解性氮、体积质量和 pH 值均以原始红松林Ⅱ最高。可见森林土壤理化性质的差异与其树种组成的差异密不可分^[9],上层土壤的理化特性因子主要受到地表凋落物层的影响,凋落物组

成的差异造成其分解快慢、多少及分解产物的化学性质的差异性。
组成均不相同,从而导致 3 种原始红松林土壤理化

表 2 辽东山区 3 种原始红松林不同土层深度土壤的理化性质

植被类型 Vegetation type	土层深度/cm Depth	有机碳/ (g·kg ⁻¹) Organic carbon	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total nitrogen	水解性氮/ (mg·kg ⁻¹) Hydrolytic nitrogen	全磷/ (g·kg ⁻¹) Total phosphorus	速效磷/ (mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	全钾/ (g·kg ⁻¹) Total potassium	体积质量/ (g·cm ⁻³) Bulk density	pH 值 pH value
原始 红松林 I Original Korean pine forest I	0~10	112.45±10.26	7.89±1.17	426.59±29.87	1.00±0.04	199.62±7.69	38.17±1.84	0.54±0.10	4.83±0.20
	10~20	36.60±0.99	3.00±0.22	197.84±14.64	0.68±0.09	135.25±18.48	28.55±1.81	0.93±0.06	4.92±0.16
	20~40	20.58±2.75	1.72±0.32	112.49±13.26	0.59±0.10	117.10±10.87	31.08±2.85	0.99±0.11	5.17±0.05
	40~60	18.68±0.41	1.32±0.17	85.40±11.27	0.56±0.07	111.41±13.80	33.39±2.69	1.05±0.10	5.20±0.06
	60~100	12.04±0.47	1.57±0.10	81.78±4.65	0.67±0.07	102.10±5.15	29.11±0.64	0.89±0.05	5.23±0.05
	平均值 Mean	40.07±2.98	5.23±0.20	180.82±14.74	0.70±0.07	133.10±11.20	32.06±1.97	0.88±0.08	5.07±0.10
原始 红松林 II Original Korean pine forest II	0~10	84.64±9.62	6.13±0.68	730.24±31.91	0.80±0.02	159.48±4.87	20.00±1.09	0.64±0.04	5.18±0.03
	10~20	50.17±5.15	4.15±0.38	538.33±26.28	0.75±0.02	149.75±4.88	20.66±1.08	0.71±0.01	5.23±0.03
	20~40	32.82±1.35	2.53±0.04	364.56±8.11	0.64±0.02	128.32±3.13	21.40±1.10	0.70±0.06	5.32±0.01
	40~60	19.02±1.99	1.65±0.12	261.55±18.39	0.55±0.01	110.53±2.42	16.31±1.31	0.91±0.05	5.34±0.03
	60~100	14.33±0.68	1.34±0.08	232.89±9.72	0.52±0.02	103.45±4.67	15.33±1.24	1.17±0.12	5.29±0.02
	平均值 Mean	40.20±3.76	3.16±0.26	425.51±18.88	0.65±0.02	130.31±3.99	18.74±1.16	0.93±0.06	5.27±0.02
原始 红松林 III Original Korean pine forest III	0~10	107.25±15.49	7.36±0.64	490.85±22.67	0.95±0.02	190.98±4.83	31.90±1.90	0.54±0.06	4.92±0.14
	10~20	45.96±3.09	3.97±0.13	263.23±8.95	0.86±0.04	172.31±7.02	27.10±2.37	0.71±0.02	5.05±0.07
	20~40	37.16±0.43	2.96±0.05	195.27±3.29	0.81±0.03	162.13±6.63	26.82±1.10	0.75±0.06	5.15±0.04
	40~60	32.20±0.32	2.48±0.07	163.47±4.66	0.73±0.03	165.12±5.76	24.16±1.11	0.73±0.04	5.18±0.06
	60~100	29.24±1.08	2.20±0.05	144.43±3.65	0.66±0.04	172.71±7.82	23.96±0.24	0.82±0.04	5.21±0.04
	平均值 Mean	50.36±4.08	3.79±0.19	251.45±8.64	0.80±0.03	172.65±6.41	26.79±1.34	0.71±0.04	5.10±0.07

3.2 辽东山区原始红松林土壤养分与土壤有机碳的相关关系

辽东山区原始红松林土壤全氮和水解性氮与土壤有机碳均存在极显著的相关性($P<0.01$),这与大多数学者得到的研究结果^[12-15]相似。图 1 显示,研究区土壤全氮与有机碳呈显著对数函数正相关关系($R^2=0.813\ 9,P<0.01,n=90$),而图 2 表明,土

壤水解性氮与有机碳则存在极显著幂函数正相关关系($R^2=0.545\ 3,P<0.01,n=90$)。土壤有机碳对土壤全氮的影响较大,二者适宜的比值(土壤碳氮比)有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放和土壤有效氮的增加,在某种程度上,土壤氮素含量决定了土壤有机碳的多少^[16-17]。

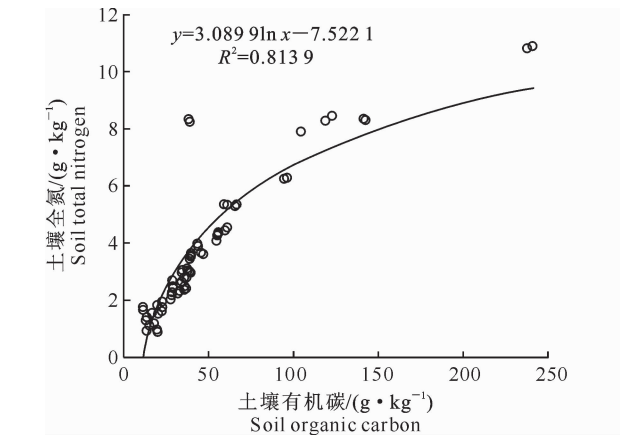


图 1 辽东山区原始红松林土壤全氮与有机碳的关系
Fig.1 Relationship between total nitrogen and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

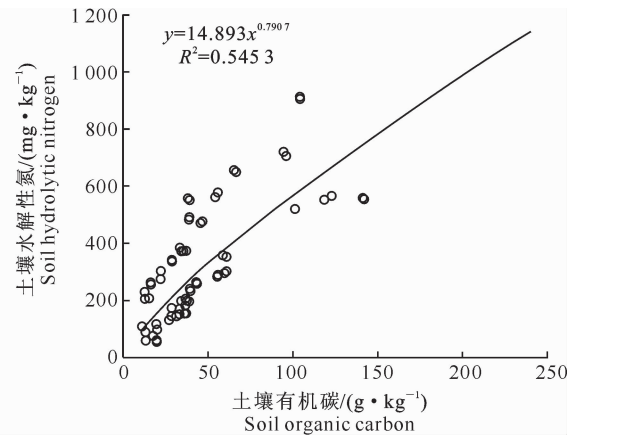


图 2 辽东山区原始红松林土壤水解性氮与有机碳的关系
Fig.2 Relationship between hydrolytic nitrogen and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

磷是土壤中重要的养分元素,与有机碳之间的关系极为密切,有机碳的分解可促使磷向土壤中释

放,同时土壤中磷的增加可促进土壤有机碳的积累^[18]。由图 3,4 可见,土壤有机碳与全磷和速效磷表现出相似的变化趋势,均呈现出极显著的对数函数正相关关系($P<0.01,n=90$),这与大多数的研

究结果^[11,13-14]相吻合,即土壤有机碳与总磷呈显著正相关关系。但也有少数研究表明,土壤有机碳与总磷呈显著负相关^[15],这与本研究的结果相反。

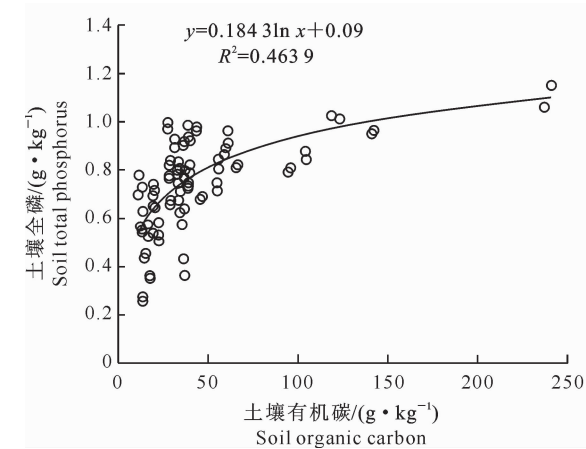


图 3 辽东山区原始红松林土壤全磷与有机碳的关系
Fig. 3 Relationship between total phosphorus and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

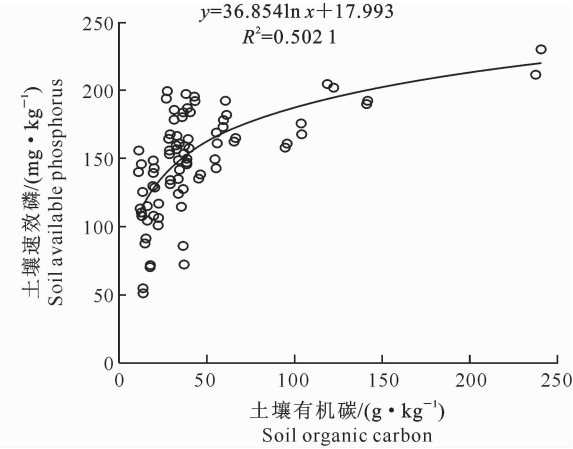


图 4 辽东山区原始红松林土壤速效磷与有机碳的关系
Fig. 4 Relationship between available phosphorus and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

图 5 显示,研究区土壤全钾与有机碳呈现极显著的指数函数负相关关系($P<0.01,n=90,R^2=$

0.408 2)。综上可知,除全钾外土壤有机碳含量与其他养分因子均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。

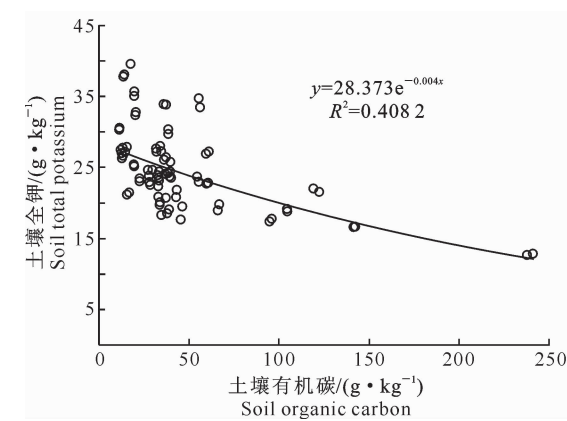


图 5 辽东山区原始红松林土壤全钾与有机碳的关系
Fig. 5 Relationship between total K and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

3.3 辽东山区原始红松林土壤体积质量、pH 值与土壤有机碳的相关关系

由图 6 可以看出,研究区土壤体积质量与有机碳有极显著的相关性($P<0.01,n=90$),二者呈幂函数负相关关系($R^2=0.6397$),表明土壤体积质量越大,其有机碳含量越小^[11,13-15],这主要是因为有机碳含量的增加使土壤结构性增强,导致土体疏松,使得土壤体积质量减小。

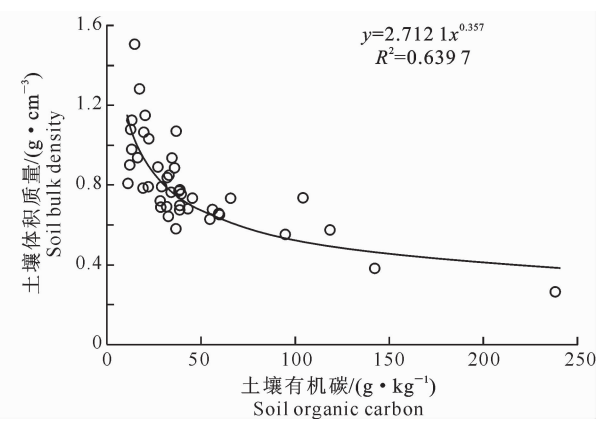


图 6 辽东山区原始红松林土壤体积质量与有机碳的关系
Fig. 6 Relationship between bulk density and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

土壤 pH 值与土壤有机碳含量一般表现为负相关关系,但有研究认为二者之间的关系需界定在一定的 pH 值范围内才有意义^[19]。由图 7 可知,本研究区土壤为弱酸性,土壤有机碳含量与土壤 pH 值呈极显著线性负相关关系($P<0.01,R^2=0.4195,n=90$)。这与前人的研究结果^[11,13-15]相一致,这是因为 pH 值会影响土壤微生物的类型和活性,进而影响土壤有机碳的矿化^[20]。土壤 pH 值越低,土壤

矿化越快,其有机碳含量就会越低。

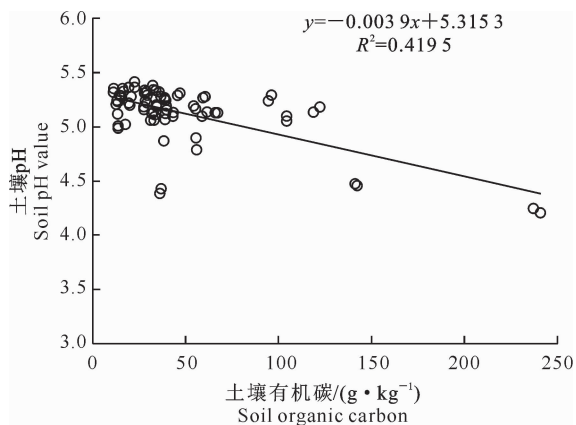


图 7 辽东山区原始红松林土壤 pH 值与有机碳的关系

Fig. 7 Relationship between pH value and organic carbon in soil in original Korean pine mixed forests in Eastern Liaoning mountainous area

4 结 论

本研究表明,在辽东山区由不同树种组成的 3 种原始红松林土壤的理化性质均随着土层深度的增加呈规律性变化,总体上随着土层深度加深,土壤养分含量减少,土壤逐渐变紧实,土壤酸性逐渐减弱。3 种原始红松林的土壤理化性质之间存在明显的差异,各个土壤理化性质的变化规律也不尽相同,主要表现为 3 红松 7 阔叶的原始红松林土壤有机碳、全磷和速效磷含量最高,6 红松 4 阔叶的原始红松林土壤全氮和全钾含量最高,而 3 红松 2 其他针叶 5 阔叶的原始红松林土壤水解性氮、体积质量和 pH 值均最高,这可能主要是因其树种组成的不同,导致地表凋落物组成的差异,使其分解的快慢、多少及分解产物的化学组成不同造成的。

研究区土壤有机碳与全氮、水解性氮、全磷、速效磷 4 个土壤养分因子均呈现出显著的正相关关系,与全钾呈现出显著负相关关系,与土壤有机碳相关性最高的为土壤全氮,同时土壤有机碳还与土壤体积质量和 pH 值呈显著负相关关系。

[参考文献]

- [1] Chimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle [J]. Global Change Biology, 1995, 1(1): 77-91.
- [2] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究 [J]. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China [J]. Bulletin of Science and Technology, 1999, 15(5): 330-332.
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-

618.

- Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 609-618.
- [4] 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.
Qin J, Kong H Y, Liu H. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(2): 68-76, 82.
- [5] 孙中伟, 赵士洞. 长白山北坡椴树阔叶红松林群落学特征 [J]. 生态学杂志, 1995, 14(5): 26-30.
Sun Z W, Zhao S D. Community features of Tilia-Korean pine forest on northern slope of Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 1995, 14(5): 26-30.
- [6] 牟长城, 孙利平, 屈红军. 辽东林区人工诱导红松阔叶混交林群落结构与动态变化 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 1-3, 10.
Mu C C, Sun L P, Qu H J. Structure and dynamic change of artificially induced Korean pine and broad-leaved mixed forests in the eastern forest region of Liaoning Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(5): 1-3, 10.
- [7] 王彦梅, 王 朋, 于立忠. 辽东山区天然次生林转化为人工林对土壤有机碳的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(12): 54-57.
Wang Y M, Wang P, Yu L Z. Effects of conversion from natural secondary forests to plantations on soil organic carbon in mountainous region of eastern Liaoning Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(12): 54-57.
- [8] 刘晓敏, 车克钧, 车宗玺, 等. 祁连山青海云杉分布带土壤的空间变异性研究 [J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(6): 86-92.
Liu X M, Che K J, Che Z X, et al. Study on soil spatial variability of *Picea crassifolia* zonation in Qilian Mountains [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(6): 86-92.
- [9] 魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质 [J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
Wei Q, Ling L, Chai C S, et al. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [10] 时雷雷, 骆土寿, 许 涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.
Shi L L, Luo T S, Xu H, et al. The fine scale spatial heterogeneity of soil physical properties in a primary tropical montane rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Forest Research, 2012, 25(3): 285-293.
- [11] 张 勇, 秦嘉海, 赵芸晨, 等. 黑河上游冰沟流域不同林地土壤理化性质及有机碳和养分的剖面变化规律 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 126-130.
Zhang Y, Qin J H, Zhao Y C, et al. Change of soil physical and chemical properties, organic carbon and nutrients of different

- soil profile on different forest in Binggou of Heihe Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 126-130.
- [12] 曹小玉, 李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析 [J]. 林业资源管理, 2014(6): 104-109.
- Cao X Y, Li J P. Contents of soil organic carbon and its relations with soil physicochemical properties in Chinese fir plantations [J]. Forest Resources Management, 2014(6): 104-109.
- [13] 魏文俊, 尤文忠, 张慧东, 等. 辽西天然油松林土壤碳氮分布规律 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 72-76.
- Wei W J, You W Z, Zhang H D, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in natural *Pinus tabulaeformis* forests of western Liaoning Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(9): 72-76.
- [14] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性 [J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.
- Zu Y G, Li R, Wang W J, et al. Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [15] 徐薇薇, 乔木. 干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1558-1561.
- Xu W W, Qiao M. soil carbon contents in relation to soil physicochemical properties in arid regions of China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1558-1561.
- [16] 于帅, 陈玮, 何兴元, 等. 大伙房水库周边 4 种河岸林的土壤理化性质 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(3): 87-89.
- Yu S, Chen W, He X Y, et al. Soil physical and chemical properties in four types riparian forests around Dahuofang Reservoir [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(3): 87-89.
- [17] Raven J A, Handley L L, Andrews M. Global aspects of C/N interactions determining plant-environment interactions [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(394): 11-25.
- [18] 仇开莉, 陈文德, 彭培好, 等. 沱江流域内江段土壤有机碳与其他要素的相关性分析 [J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 28-31.
- Qiu K L, Chen W D, Peng P H, et al. Analysis on correlation between soil organic carbon and other factors in Neijiang Section of Tuojiang River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 28-31.
- [19] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513-519.
- [20] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
- Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [22] Kelley L A, Sternberg M J E. Structure prediction on the web: a case study using the Phyre server [J]. Nature Protocols, 2009, 4: 367-371.
- [23] 孙欣, 上官凌飞, 房贵贵, 等. 葡萄 NAC 转录因子家族生物信息学分析 [J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30(2): 229-242.
- Sun X, Shanguan L F, Fang J G, et al. Bioinformatics analysis of the NAC transcription factor family in Grapevine [J]. Genomics and Applied Biology, 2011, 30(2): 229-242.
- [24] 韩璐, 张薇. 棉花苗期氮营养高效品种筛选 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 84-88.
- Han L, Zhang W. Screening of cotton varieties with high nitrogen efficiency at seedling stage [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 84-88.
- [25] 涂礼莉, 张献龙, 刘迪秋, 等. 棉花纤维发育和体细胞胚发生过程中实时定量 PCR 内对照基因的筛选 [J]. 科学通报, 2007, 52(20): 2379-2385.
- Tu L L, Zhang X L, Liu D Q, et al. Screening of real-time quantitative PCR in the process of somatic embryogenesis in cotton fiber development [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(20): 2379-2385.
- [26] Udall J A, Swanson J M, Haller K, et al. A global assembly of cotton ESTs [J]. Genome Res, 2006, 16(3): 441-450.
- [27] 邹扬. Argonaute 蛋白家族在 RNAi 中的作用 [J]. 医学分子生物学杂志, 2006, 3(1): 55-57.
- Zou Y. Roles of Argonaute proteins in RNA interference [J]. J Med Mol Biol, 2006, 3(1): 55-57.
- [28] Zheng X, Zhu J, Kapoor A, et al. Role of *Arabidopsis* AGO6 in siRNA accumulation DNA methylation and transcriptional gene silencing [J]. The EMBO J, 2007, 26(6): 1691-1701.
- [29] Mallory A C, Bouche N. MicroRNA-directed regulation: to cleave or not to cleave [J]. Trends in Plant Science, 2008, 13(7): 359-367.
- [30] 王文婧, 刘婷, 郭磊, 等. *SLC/AGO1* 基因控制拟南芥细胞分裂与定向伸长 [J]. 植物学报, 2011, 46(4): 370-378.
- Wang W J, Liu T, Guo L, et al. *SLC/AGO1* coordinates cell division and expansion in *Arabidopsis* [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2011, 46(4): 370-378.
- [31] Montgomery T A, Yoo S J, Fahlgren N, et al. AGO1-miR173 complex initiates phased siRNA formation in plants [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 20055-20062.

(上接第 69 页)