

冀北辽河源地区不同林龄油松天然次生林土壤理化特征的研究

赵伟红, 康峰峰, 韩海荣*, 赵金龙, 高晶, 于晓文, 宋小帅, 立天宇

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要:为探讨不同林龄的油松天然次生林土壤理化性质的差异及规律,以辽河源地区油松(*Pinus tabulaeformis*)天然次生林为研究对象,研究了不同林龄林分的土壤理化特征及其垂直分布特征。结果表明:1)随着林龄的增加,土壤pH值和土壤全P含量逐渐增加而土壤容重逐渐降低,土壤自然含水量、土壤全K含量先降后增,而土壤有机质、土壤全N含量先增后降。林龄对林分土壤物理性质影响不显著,而对林分土壤化学性质影响显著。2)各林龄林地土壤容重、土壤pH值随着土层深度的增加而增加,土壤自然含水量、土壤有机质含量、N、P、K含量随着土层深度的增加逐渐降低。3)土壤理化各指标间关系密切,除土壤全P与土壤其它理化性质间均无显著相关外,其它各指标间的相关性显著,相关系数正负均有,相关性较为复杂。

关键词:辽河源;油松天然次生林;林龄;土层深度;土壤理化性质

中图分类号:S791.254 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2014)03-0001-08

Physicochemical Properties of the Soils of *Pinus tabulaeformis* Natural Secondary Stands with Different Ages in Liaoheyuan Area of Northern Hebei

ZHAO Wei-hong, KANG Feng-feng, HAN Hai-rong*, ZHAO Jin-long, GAO Jing,
YU Xiao-wen, SONG Xiao-shuai, LI Tian-yu

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:Differences and variation patterns of the soil physicochemical properties in natural secondary *Pinus tabulaeformis* forests with different ages occurring in Liaoheyuan Nature Reserve, Hebei province were investigated. The results showed that:1)with the increase of forest age, soil moisture and soil total K content decreased first and then increased gradually. Soil bulk density reduced steadily while soil pH and soil total P content increased slightly, respectively. Soil organic matter and soil total N content increased first and then decreased significantly. Variance analysis and multiple comparison results demonstrated that the stand age had non-significant effects on soil physical properties but considerable effects were observed on soil chemical properties in different soil layers. 2)The soil bulk density and soil pH increased with the soil layer deepening while the soil moisture, soil organic matter, soil total N, soil total P and soil total K decreased with the increase of soil depth. 3)Significant correlations either positive or negative were found among the indices of soil physicochemical properties except for soil total P.

Key words:Liaoheyuan Natural Reserve; *Pinus tabulaeformis*; forest age; soil layer; soil physicochemical property

辽河源自然保护区是河北省最大的自然保护 区,由于长期以来人类对生物资源的过度开发,超越

收稿日期:2013-09-05 修回日期:2013-10-11

基金项目:林业公益性行业科研专项(201204101)。

作者简介:赵伟红,女,在读硕士,研究方向:森林生态学。E-mail: cherryweihong@163.com

*通信作者:韩海荣,男,教授,研究方向:森林生态学。E-mail: hanhr@bjfu.edu.cn

了该区作为脆弱的生态交错带山地系统的承载和抵抗能力。原始的天然植被不断减少,生态系统的稳定性遭受影响,林区土壤结构松散,并由此表现出一系列的生态失调现象。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,并随植被生长不断地发生变化,它为森林的生长发育、繁衍生息提供了必要的环境条件,是植物群落更新演替过程中不可或缺的研究内容。土壤养分及其含量影响着森林的结构及森林的演替,并维持着地球上的生态系统平衡,是森林生态系统可持续发展的基础。因此,研究不同林龄林分土壤的理化性质,了解林龄与森林土壤理化性质间的关系,对于该地的森林更新、保护具有重要意义^[1]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国特有树种、我国暖温带湿润半湿润地区地带性植被,因其适应性强、根系发达、抵御不利环境强的特点,已成为华北地区山地植被的主要建群种^[2]。目前,国内外关于油松的研究主要集中在油松人工林的土壤理化特性和生物碳储量方面^[3-9],然而,以多个龄组天然林及其次生林土壤理化特征的研究较少。在当前原生林大幅减少,次生林大面积增加的背景下,研究油松天然次生林林龄差异与土壤养分特征的关系,揭示油松天然次生林在演替过程中土壤养分变化的特征,以期为辽河源自然保护区的管理、保护及可持续发展提供一定的数据支撑和理论指导。

1 研究地概况

研究地位于河北省平泉县辽河源自然保护区大窝铺林场,地理位置为 $118^{\circ}22' \sim 118^{\circ}37'E$, $41^{\circ}01' \sim 41^{\circ}21'N$,是冀、辽、蒙3省交界的辽河源头,也是燕山山地重要的生态屏障。该地处于暖温带向寒温带过渡地带,属半湿润半干旱大陆性季风型山地气候,年均气温 $7.3^{\circ}C$,昼夜温差大。年平均降雨量540 mm,年平均蒸发量1 800 mm,湿润度为0.4。

表1 油松天然次生林试验样地基本情况

Table 1 Basic situation of *P. tabulaeformis* plantation plots

龄组	数量	密度 /(株·hm ⁻²)	海拔/m	坡向	坡度 /(°)	平均胸径/cm	郁闭度	盖度 /%	林下植被主要种类
幼龄林	4	1 900 ~ 2 567	1 058 ~ 1 097	SE,E	27 ~ 32	11.75 ± 1.05	0.46 ~ 0.68	66.80 ± 3.50	苔草、艾蒿、土庄绣线菊、山梅花、野鸢尾等9种
中龄林	6	1 034 ~ 1 050	985 ~ 1 050	S,E	20 ~ 31	17.16 ± 1.96	0.45 ~ 0.76	78.90 ± 2.60	苔草、艾蒿、土庄绣线菊、胡枝子、玉竹等10种
近熟林	5	617 ~ 867	998 ~ 1 018	S,E	17 ~ 31	21.56 ± 1.44	0.45 ~ 0.60	60.43 ± 3.70	土庄绣线菊、玉竹、胡枝子、照山白、败酱等10种
成熟林	3	717 ~ 934	1 066 ~ 1 089	E	23 ~ 31	23.07 ± 0.18	0.42 ~ 0.50	67.04 ± 3.50	艾蒿、土庄绣线菊、胡枝子、野鸢尾、败酱等11种
过熟林	3	284 ~ 434	972 ~ 999	N,E	8 ~ 19	35.31 ± 2.70	0.25 ~ 0.37	95.80 ± 4.60	苔草、艾蒿、土庄绣线菊、玉竹、胡枝子等11种

注:SE表示东南坡,E表示东坡,S表示南坡,N表示北坡。

土壤主要是棕壤土和褐土,土层深厚。

森林植被主要是油松天然次生林,其主要伴生种为辽东栎(*Q. wutaishanica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙椴(*Tilia mongolica*)、黄榆(*Ulmus macrocarpa*)等。灌木层有锦带花(*Weigela florida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、榛子(*Corylus heterophylla*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)等。草本层发育较好,以细叶薹草(*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*)为主,其它组成种主要是野青茅(*Deyeuxia pyramidalis*)、银背风毛菊(*Saussurea nivea*)、石竹(*Dianthus chinensis*)、玉竹(*Polygonatum odoratum*)等。

2 研究方法

2.1 样地调查

根据国家林业局《森林资源规划设计调查主要技术规定》(2003)和《国家森林资源连续清查技术规定》(2003)中对油松天然林龄组的划分标准(油松天然林幼龄林 ≤ 30 a、中龄林 $31 \sim 50$ a、近熟林 $51 \sim 60$ a、成熟林 $61 \sim 80$ a、过熟林 ≥ 81 a),于2012年植物生长季(7—9月),选择林相整齐、具有代表性的油松天然次生林地段作为固定样地。在上述试验林内共设计21块(幼龄林4块、中龄林6块、近熟林5块、成熟林3块、过熟林3块)面积为600 m²(20 m × 30 m)的固定样地。对样地内所有乔木进行每木检尺,测定各株林龄、株数密度、枝下高、冠幅、群落郁闭度、平均树高、平均胸径等,记录样方内灌木和草本的物种组成、数量、盖度、高度、地径,并进行土壤采集和分析,样地土壤主要是棕壤土和褐土。在样地选择时,尽量选择地形要素、土壤与成土母质的类型基本一致,以便使它们在更新前后具有同源性和一致性(表1)。

2.2 土壤样品的采集与处理

在样地内,采用常规的典型抽样法,每样地挖取3个土壤剖面。首先观察土壤剖面的层次、厚度、颜色、湿度、结构、紧实度、质地、植物根系分布等,然后从上到下按照0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm和80~100 cm分6层采集各土层的土壤样品,每一层平行取3次,共计1134份样品。记录土壤每层的颜色、结构、紧实度、根量、石砾含量。将所采土壤样品装入土壤密封袋,在自然条件下阴干。带回实验室后,用镊子除去石块、根系、动物等杂物后磨碎,过1 mm、0.25 mm筛保存,随后进行土壤化学性质分析^[10];同时用环刀(100 cm³)在每一层取土样测定土壤容重和土壤自然含水量,3次重复。去除环刀内土样的植物根系和石砾,在105℃烘干12 h后,称量并计算其土壤容重和土壤自然含水量。

2.3 土壤理化性质测定方法

土样采用中华人民共和国林业行业标准方法进行测定^[11]。土壤容重及自然含水量采用环刀法测定;土壤pH值测定采用电位法[m(土):m(水)=1:2.5];土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化—外加热法;土壤全N含量测定采用浓硫酸—高氯酸消煮—凯氏定氮法;全P含量测定采用浓硫—高氯酸消煮—钼锑抗比色法;全K含量测定采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法。

2.4 数据分析

数据处理采用Excel2007进行整理分析,采用单因素方差分析结合LSD法多重比较、相关性分析运用SPSS19.0软件进行^[12]。

3 结果与分析

3.1 不同林龄油松天然次生林土壤物理性质的特征变化

2012年与2013年2次测定的土壤含水量存在一定的差别,但表现出相似的规律性(表2)。不同林龄油松天然次生林土壤自然含水量在各土层变化规律略有不同。0~60 cm土层,土壤自然含水量变化规律为:过熟林>成熟林>幼龄林>中龄林>近熟林;60~100 cm土层,土壤自然含水量变化规律为:成熟林>幼龄林>过熟林>中龄林>近熟林。方差分析显示,在0~10 cm和40~80 cm土层,各林龄间土壤自然含水量差异均不显著($p>0.05$);10~20 cm土层,过熟林与中林龄、近熟林存在显著差异($p<0.05$),与其它2种林分差异不显著;20~40 cm土层,过熟林土壤自然含水量与幼龄林、中林

表2 不同林龄油松天然次生林土壤物理性质

Table 2 Change of soil physical properties affected by the age in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest

龄组	土壤深度/cm	容重/ $(g \cdot cm^{-3})$	含水量/%	
			2012	2013
幼龄林	0~10	1.49±0.15a	12.98±0.03a	8.61±0.06a
	10~20	1.51±0.08a	10.66±0.04ab	8.56±0.03ab
	20~40	1.52±0.04ab	8.90±0.04b	6.27±0.02b
	40~60	1.50±0.20a	11.75±0.07a	8.59±0.01a
	60~80	1.54±0.19ab	8.82±0.06a	5.66±0.05a
	80~100	1.62±0.18a	9.61±0.03a	6.98±0.03a
中龄林	0~10	1.41±0.14a	11.64±0.05a	12.83±0.05a
	10~20	1.46±0.07a	10.01±0.03b	8.03±0.02b
	20~40	1.57±0.08a	7.80±0.02b	7.33±0.02b
	40~60	1.59±0.05a	7.63±0.02a	6.79±0.01a
	60~80	1.59±0.11ab	7.10±0.02a	5.18±0.02a
	80~100	1.55±0.08a	5.52±0.02b	3.23±0.02b
近熟林	0~10	1.40±0.11a	10.53±0.02a	9.54±0.02a
	10~20	1.51±0.09a	8.57±0.03b	7.65±0.03b
	20~40	1.54±0.11ab	7.52±0.03b	6.20±0.02b
	40~60	1.50±0.18a	7.29±0.03a	5.71±0.02a
	60~80	1.43±0.10b	5.74±0.01a	4.05±0.02a
	80~100	1.55±0.14a	4.38±0.01b	4.03±0.04b
成熟林	0~10	1.33±0.26a	14.41±0.05a	9.91±0.02a
	10~20	1.43±0.12a	12.85±0.04ab	9.71±0.03ab
	20~40	1.58±0.09ab	9.52±0.05ab	4.05±0.02ab
	40~60	1.68±0.04a	8.53±0.05a	3.31±0.06a
	60~80	1.67±0.08a	8.54±0.05a	2.54±0.04a
	80~100	1.48±0.15a	10.32±0.05a	1.82±0.06a
过熟林	0~10	1.32±0.37a	20.18±0.06a	16.65±0.03a
	10~20	1.40±0.28a	15.94±0.07a	14.37±0.05a
	20~40	1.40±0.22b	15.46±0.06a	14.20±0.05a
	40~60	1.65±0.11a	12.73±0.05a	8.33±0.04a
	60~80	1.67±0.08a	8.16±0.02a	8.04±0.02a
	80~100	1.48±0.15a	6.91±0.01ab	8.02±0.02ab

注:表中数据均为均值±标准差;同列小写字母表示不同林龄间差异显著($p<0.05$)。

龄、近熟林存在显著差异,与成熟林差异不显著。同一土层土壤容重在不同林龄阶段上表现也不同。在0~20 cm土层,随着林龄的增加,土壤容重逐渐降低,即幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林,但方差分析显示土壤容重在各林龄间差异均不显著;20~40 cm土层,土壤容重变化规律为,成熟林>中龄林>近熟林>幼龄林>过熟林,过熟林和中龄林差异显著;40~60 cm土层土壤容重大小为成熟林>过熟林>中龄林>近熟林>幼龄林,各林龄间差异均不显著;60~80 cm土层,土壤容重大小为成熟林=过熟林>中龄林>幼龄林>近熟林。其中过熟林与近熟林和成熟林差异显著,其它4种林龄间均差异不显著;80~100 cm土层,随着林龄的增加,土壤容重也随之降低,各林龄间差异均不显著。

随着土层深度的增加,各林龄土壤自然含水量逐渐降低,土壤容重逐渐增加。土壤自然含水量与土壤容重呈极显著负相关关系。同一林龄在不同土层间土壤自然含水量、土壤容重差异不显著。

3.2 不同林龄油松天然次生林土壤化学性质的特征变化

3.2.1 土壤 pH 值随着林龄的变化规律 土壤 pH 值的变化随林龄增加有所波动,油松天然次生林土壤 pH 值在 0~80 cm 各层均是近熟林>中龄林>过熟林>成熟林>幼龄林。就 80~100 cm 土层而言,土壤 pH 值以近熟林>中龄林>过熟林>幼龄林>成熟林(图 1)。方差分析可知:0~10 cm,40~60 cm,60~80 cm 土层,幼龄林土壤 pH 值和中龄林、近熟林土壤 pH 值差异显著($p<0.05$)。中龄林、近熟林、成熟林、过熟林间 pH 值差异不显著($p>0.05$)。10~20 cm 土层,幼龄林土壤 pH 值和近熟林土壤 pH 值差异显著。20~40 cm,80~100 cm 土层,幼龄林、成熟林土壤 pH 值和中龄林、近熟林土壤 pH 值差异显著。

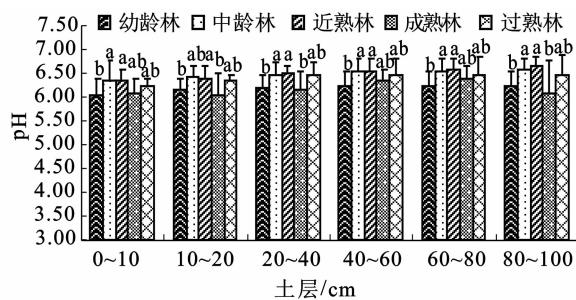


图 1 不同林龄油松天然次生林土壤 pH 变化

Fig. 1 Changes of the soil pH in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest with different ages

随土层深度的增加,土壤 pH 值有缓慢增加的趋势,在 6.00~6.60 之间变化;单因素方差分析表明:中龄林、近熟林各土层间土壤 pH 值有显著性差异。其它林龄,各土层间 pH 值差异均不显著。

3.2.2 土壤有机质随着林龄的变化规律 图 2 所示,油松天然次生林土壤有机质含量为 4.32~28.10 g·kg⁻¹。同一土层土壤有机质含量在不同林龄阶段上表现不同,0~20 cm 土层,土壤有机质含量大小为成熟林>近熟林>过熟林>中龄林>幼龄林,其中近熟林与成熟林的含量相差不大,近熟林、成熟林土壤有机质含量与其它各林龄差异显著。20~40 cm 土层,土壤有机质含量大小为近熟林>成熟林>过熟林>中龄林>幼龄林,近熟林、成熟林土壤有机质含量与其它各林龄差异显著。40~80 cm 土层,土壤有机质含量大小为近熟林>中龄林>

过熟林>成熟林>幼龄林。80~100 cm 土层,土壤有机质含量大小为近熟林>中龄林>成熟林>幼龄林。40~60 cm 土层,油松近熟林土壤有机质含量与其它各林龄差异显著。60~100 cm 土层,油松中龄林、近熟林土壤有机质含量与其它各林龄差异显著。在垂直剖面上,各林龄土壤有机质含量随土层深度的增加逐渐降低,同一林龄各土层间,差异性显著。

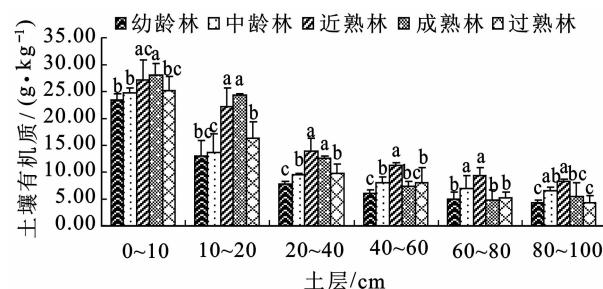


图 2 不同林龄油松天然次生林土壤有机质变化

Fig. 2 Changes of the soil organic matter in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest with different ages

3.2.3 土壤全 N 含量随着林龄的变化规律 不同林龄阶段油松天然次生林全 N 含量在 0~10 cm 土层,油松成熟林土壤全 N 含量>过熟林>幼龄林>中龄林>近熟林。20~100 cm 土层,油松成熟林土壤全 N 含量>幼龄林>过熟林>近熟林>中龄林(图 3)。方差分析可知:0~20 cm 土层,油松中龄林、近熟林土壤全 N 含量与其它各林龄差异显著。20~40 cm 土层,油松中林龄土壤全 N 含量幼龄林、成熟林、成熟林差异显著。40~60 cm 土层,油松中龄林、近熟林土壤全 N 含量与幼龄林、成熟林差异显著。60~80 cm 土层,幼龄林、成熟林土壤全 N 含量与其它各林龄差异显著。80~100 cm 土层,中龄林土壤全 N 含量与幼龄林、成熟林、过熟林差异显著。

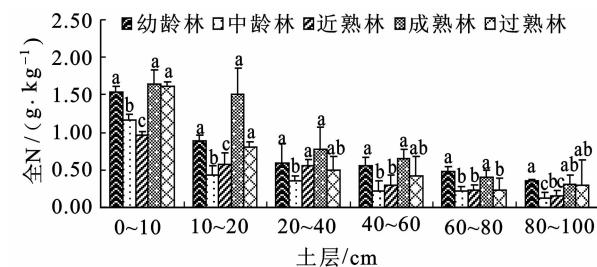


图 3 不同林龄油松天然次生林土壤全 N 含量变化

Fig. 3 Changes of the soil total N in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest with different ages

油松天然次生林各林龄土壤全 N 含量随土层深度的增加逐渐降低。其中,成熟林土壤全 N 含量最高。近熟林、中林龄土壤全 N 含量较低。其变化规律与土壤有机质垂直分布特征较为一致,同一林龄各土层间差异性显著。

3.2.4 土壤全P含量随着林龄的变化规律 各林龄土壤全P含量变化程度(图4)表明,土壤全P含量随着土层深度的增加逐渐降低。0~40 cm土层,随着林龄的增加,土壤全P含量逐渐降低。40~100 cm土层,油松成熟林土壤全P含量有升高现象。成熟林土壤全P含量大于近熟林。方差分析可知,0~10 cm土层,幼龄林、中龄林土壤全P含量与其它各林龄差异显著。10~40 cm土层,幼龄林土壤全P含量与其它各林龄差异显著。40~100 cm土层,幼龄林土壤全P含量与近熟林、过熟林存在显著差异。在垂直剖面上,土壤全P含量大小变化幅度较小,各土层间差异均不显著。

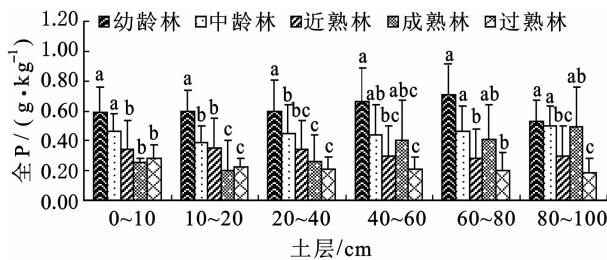


图4 不同林龄油松天然次生林土壤全P含量变化

Fig. 4 Changes of the soil total P in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest with different ages

3.2.5 土壤全K含量随着林龄的变化规律 同一土层土壤含全K量在不同林龄阶段表现不同,随着林龄变化出现波动。0~20 cm土层,土壤全K含量油松过熟林>成熟林>幼龄林>近熟林>中龄林。20~60 cm土层,土壤全K含量油松过熟林>成熟林>幼龄林>中龄林>近熟林。60~100 cm土层,土壤全K含量油松成熟林>过熟林>幼龄林>中龄林>近熟林。成熟林、过熟林土壤全K含量较高,中龄林、近熟林土壤全K含量较低(图5)。

由方差分析可知,0~10 cm土层,过熟林、成熟林与其它各林龄差异显著($p<0.05$),但二者差异不显著,其它各林龄间差异皆不显著($p>0.05$)。10~20 cm土层,过熟林、成熟林与中龄林、近熟林

差异显著。幼龄林与其它各林龄差异均不显著。20~40 cm土层,过熟林土壤全K含量最大,与幼龄林、中龄林、近熟林土壤全K含量差异显著。过熟林与成熟林土壤全K含量差异不显著。40~60 cm土层,过熟林土壤全K含量最大,与中龄林、近熟林、成熟林差异显著。过熟林与幼龄林土壤全K含量差异不显著。60~80 cm土层,土壤全K含量成熟林、过熟林、幼龄林与中龄林、近熟林差异显著。成熟林、过熟林、幼龄林三者土壤全K含量差异不显著。中龄林、近熟林土壤全K含量差异不显著。80~100 cm土层,成熟林与其它各林龄差异显著。在垂直剖面上,油松天然次生林各林龄土壤全K含量随着土层深度的增加逐渐降低。除幼龄林各土层土壤全K含量差异不显著外,其它林龄林分土壤全K含量在各土层差异显著。

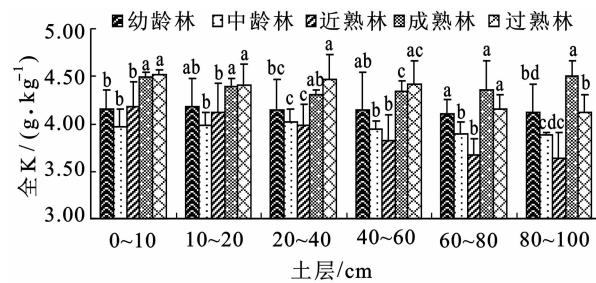


图5 不同林龄油松天然次生林土壤全K含量变化

Fig. 5 Changes of the soil total K in the *P. tabulaeformis* natural secondary forest with different ages

3.3 土壤各测定指标之间相关性分析

相关性分析结果(表3)表明各测定指标间有着密切的相关性。土壤含水量与土壤容重、土壤pH值呈极显著负相关,与土壤有机质、全N、全K呈极显著正相关;土壤容重与土壤有机质、全N呈极显著负相关;土壤pH与土壤有机质、全N、全K呈极显著负相关;土壤有机质与全N呈极显著正相关;土壤全N与土壤全K呈极显著负相关;土壤全P与土壤其它指标间均无相关关系。

表3 各测定指标之间的相关性分析

Table 3 Correlation among different indices

土壤性质	含水量	容重	pH	有机质	全N	全P	全K
含水量	1.000						
容重	-0.582 **	1.000					
pH	-0.569 **	0.275	1.000				
有机质	0.563 **	-0.695 **	-0.472 **	1.000			
全N	0.740 **	-0.602 **	-0.788 **	-0.855 **	1.000		
全P	-0.178	0.201	-0.266	-0.237	-0.080	1.000	
全K	0.759 **	-0.190	-0.597 **	0.253	0.522 **	-0.203	1.000

注: ** 表示相关性显著水平 $p<0.01$, * 表示相关性显著水平 $p<0.05$ 。

4 结论与讨论

4.1 不同林龄油松天然次生林土壤物理性质变化规律及空间差异原因

土壤含水量是土壤孔隙度状况及土壤持水能力的综合体现。能够较好的反映土壤水分和林内湿润状况^[13]。林地土壤的水分状况与气候、植被、地形、土壤性质等自然因素有关,土壤水分对森林的生长起着重要的制约作用。影响土壤水分状况的因素很多,如植被的组成和覆盖度、降水量和蒸发量、土壤的质地,结构和有机质含量、地形条件、水文地质以及人为活动的影响。本试验地林地土壤水分动态变化主要取决于降水量的多少,以及土壤的质地,结构情况和有机质的含量,植物根系分布层次的深浅。本研究中随着油松天然次生林林龄的增加,土壤含水量先降低后增加,过熟林土壤含水量最高,近熟林最低。这主要是因为过熟林土壤林分密度低,蒸腾作用散失的水分较少,因而含水量最高。近熟林为满足自身生长,从土壤中吸收大量水分,从而导致含水量降低,这与张远东^[14]的研究结果不同,原因可能是研究区域不同、树种不同,导致含水量随林龄的变化规律不一致。各林龄土壤水分垂直变化总体趋势基本上一致,呈现减少趋势,这与刘勇^[15]的研究结果较为一致。这是由于土壤表层地表凋落物较为丰富,土壤孔隙度大,土松软,石砾含量较多利于降雨的截留。但是降雨的入渗深度有限,加上底层土壤石砾含量较少,土质坚硬、紧实,土壤通透性变差,同时植物蒸腾作用导致根系大量吸收土壤水分,致使底层土壤含水量变低。

土壤容重是土壤物理性质的一个重要指标,是土壤松紧程度的一项尺度,影响土壤的渗水性、通气性、入渗性能、持水能力^[16]。容重越大,表明土壤越紧实,通气性越差;容重越小,表明土壤疏松多孔,物理通气性较好。植物根系的生长以及凋落物等分解对土层土壤的影响有很大关系。土壤容重对于土壤质地与结构有较好的指示作用。相关性分析表明:土壤容重与土壤含水量呈极显著负相关,容重越低,土壤持水性越强。土壤容重与土壤有机质、全N呈极显著负相关。油松天然次生林土壤容重随着林龄的增加逐渐降低,过熟林土壤容重最小,除有机质对其有一定影响外,该林地林分郁闭度较小、坡度较缓,人为干扰较低,这与周萍^[17]的研究结果比较一致。土壤容重在各林龄垂直变化总体趋势,随着土层深度的增加而增加。其原因主要是林地上有很多易分解的凋落物,提高了土壤有机质含量,改良了土壤结构,使土体构造相对疏松,土壤容蓄能力增强,

这与田大伦^[18]的研究结果一致。

4.2 不同林龄油松天然次生林土壤化学性质变化规律及空间差异原因

土壤pH值是土壤的重要的基本性质之一^[19],大多数植被必需的营养元素的有效性与土壤的pH值有关,所以,了解土壤的酸碱度状况,对了解土壤养分的有效性具有重要意义。在进行土壤养分测定的同时,土壤pH值的测定也是不可缺少的指标之一。由研究结果可知,随林龄的增加油松天然次生林土壤pH值的变化随林龄增加有所波动,油松天然次生林土壤pH值0~80 cm各层均是近熟林>中龄林>过熟林>成熟林>幼龄林。80~100 cm土层,土壤pH值近熟林>中龄林>过熟林>幼龄林>成熟林,土壤pH值与土壤含水量、土壤有机质、全N、全K呈极显著负相关关系。各林龄土壤pH值随土层深度的增加有缓慢增加的趋势,这与逯军峰^[20]的研究结果一致。土壤有机质是森林土壤的重要组成部分,是体现土壤肥力水平的重要标志之一^[21]。森林土壤有机质不仅可以提供树木生长所需养分,还直接影响土壤物理、化学和生物学性质,从而改善土壤的透水性、蓄水性、通气性,促进土壤结构形成,提高植物根系生长环境,提高森林土壤肥力和缓冲性能,同时有利于保持水土、涵养水源^[22-23]。随林龄的增加油松天然次生林土壤有机质含量总体趋势为先增加后降低。近熟林土壤有机质含量最高,幼龄林含量最低。土壤有机质与全N呈极显著正相关关系^[24-25]。土壤全N含量是衡量土壤氮素供应状况的重要指标,直接影响植物的生长发育。土壤全N含量的消长,主要决定于生物积累和分解作用的相对强弱、气候、植被等诸多因素。土壤全N含量的大小主要决定于土壤有机质的积累与分解强度,与土壤有机质变化有密切的关系。本研究中土壤全N含量,成熟林最高,中龄林、近熟林较低。土壤N素主要以有机态存在,因此,土壤有机质含量越高,全N含量也越高^[26]。P是植物体内核酸、蛋白质和酶等多种化合物的组成元素,是植物生长的主要营养元素之一^[27]。它参与物质、能量的合成与运转,因而,土壤P含量也是重要的研究内容之一^[28]。在自然森林生态系统中,其主要来源于林地凋落物的矿化以及土壤矿质颗粒的风化过程。土壤全P含量总体趋势,随着林龄的增加逐渐降低。在垂直剖面上,土壤全P含量大小变化幅度较小,各土层间差异均不显著,这与陈雪^[29]的研究结果较为不同,原因可能是油松天然次生林和油松人工林林分起源不同导致土壤养分之间的不同。全K是土壤重要的理化指标,亦是作物吸收量最多的营

养元素之一。K 素能增强植物的抗病性,并能缓和由于 P 肥过多引起的有害作用。K 元素能减少蒸腾,调节植物组织中的水分平衡,提高植物的抗旱性^[30]。在严寒冬季,K 肥可以促进植物中淀粉转化为可溶性糖类,从而提高植物的抗寒性。土壤全 K 含量反映了土壤 K 素的潜在供应能力。成熟林、过熟林土壤含 K 量较高,中龄林、近熟林较低,土壤全 K 与土壤全 N 呈极显著负相关关系。林龄是土壤化学性质空间变化的一个重要因子。成熟林、过熟林郁闭度较低,林地光照强烈,地面温度升高,生物活动增强,凋落物量也增加,分解速度加快,整体肥力水平有所改善。在垂直剖面上,油松天然次生林各林龄土壤全 K 含量随着土层深度的增加逐渐降低,这与渠开跃^[31]的研究结果较为一致。

各林龄土壤养分垂直分布土壤 pH 值随着土层深度的增加有缓慢增加的趋势,是因为油松天然次生林林下凋落物分解产生较多的有机酸,表层枯枝落叶降低土壤 pH 值的缘故。土壤有机质、土壤全 N 含量、土壤全 P 含量、土壤全 K 含量随着土层深度的增加逐渐降低。原因可能是表层为有枯落物覆盖,土壤动物和微生物种群数量最多,植物根系密度最大的一层。土层越深,微环境越差,越不利于土壤动物、微生物生存及植物根系的生长。因此从表层到深层,有机养分产生量逐渐减少,生物固氮作用减弱和生物残体减少,致使土壤有机质、全 N、全 P、全 K 含量减少。

参考文献:

- [1] 黄承标,吴仁宏,何斌,等.三匹虎自然保护区森林土壤理化性质的研究[J].西部林业科学,2009,38(3):16-21.
HUANG C B, WU R H, HE B, et al. Physical and chemical property of forest soil in Three Tiger Nature Reserve[J]. Journal of West China Forestry Science, 2009, 38 (3): 16-21. (in Chinese)
- [2] 李国雷,刘勇,李瑞生,等.油松人工林土壤质量的演变[J].林业科学,2008,44(9):76-81.
LI G L, LIU Y, LI R S, et al. Change of soil quality affected by forest age of *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44 (9): 76-81. (in Chinese)
- [3] SAMPSON D A, WARING R H, MAIER C A, et al. Fertilization effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production:a new hybrid process model for stand management[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 221 (1/3):91-109.
- [4] PILBEAM C J, MATHEMA S B, GREGORY P J, et al. Soil fertility management in the mid-hills of Nepal: practices and perceptions[J]. Agriculture and Human Values, 2005, 22 (2): 243-258.
- [5] 陆桂红,施鹏程,耿玉清,等.京北地区公路绿化带土壤养分特征研究[J].西北林学院学报,2011,26(2):42-46.
LU G H, SHI P C, GENG Y Q, et al. Soil nutrient characteristics of roadside greenbelts in northern Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26 (2): 42-46. (in Chinese)
- [6] 曹小玉,杨文龙,刘悦翠,等.马尾松林生态系统碳贮量研究[J].西北林学院学报,2012,27(5):45-49.
CAO X Y, YANG W L, LIU Y C, et al. Carbon storage quantity of *Pinus massniana* ecosystem[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27 (5): 45-49. (in Chinese)
- [7] 张俊华,常庆瑞,张佳宝.不同林龄人工林对退化生态系统土壤肥力质量的影响[J].土壤通报,2006,37(3):429-433.
ZHANG J H, CHANG Q R, ZHANG J B, et al. Effect of different age forests on soil fertility quality of degraded ecosystems[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37 (3): 429-433. (in Chinese)
- [8] 刘增文,段而军,刘卓玛姐,等.黄土高原半干旱丘陵区不同树种纯林土壤性质极化研究[J].土壤学报,2009,46(6):1110-1120.
LIU Z W, DUAN E J, LIU Z M J, et al. Soil polarization under pure stands of different tree varieties in semi-arid hilly areas of the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (6): 1110-1120. (in Chinese)
- [9] 李靖,马永禄,罗杰,等.黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐林养分特征与生物量研究[J].西北林学院学报,2013,28(3):7-12.
LI J, MA Y L, LUO J, et al. Nutrients and biomass of different-aged *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess hilly region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28 (3): 7-12. (in Chinese)
- [10] 刘聪,朱教君,吴祥云,等.辽东山区次生林不同大小林窗土壤养分特征[J].东北林业大学学报,2011,39(1):79-81.
LIU C, ZHU J J, WU X Y, et al. Characteristics of soil nutrients within canopy gaps of various sizes in secondary forests in eastern mountainous regions of Liaoning province, China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39 (1): 79-81. (in Chinese)
- [11] 国家林业局. LY/T 1213-1999. 中华人民共和国林业行业标准—森林土壤分析方法[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [12] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M].4 版.北京:电子工业出版社,2006:336-374.
- [13] 庞学勇,包维楷,张咏梅,等.岷江柏林下土壤物理性质及其他理空间差异[J].应用与环境生物学报,2004,10(5):596-601.
PANG X Y, BAO W K, ZHANG Y M, et al. Geographical comparison of soil physical properties under *Cupressus chengiana* forests[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10 (5): 596-601. (in Chinese)
- [14] 张远东,刘世荣,马姜明,等.川西亚高山桦木林的林地水文效应[J].生态学报,2005,25(11):2939-2946.
ZHANG Y D, LIU S R, MA J M, et al. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (11): 2939-2946. (in Chinese)
- [15] 刘勇,上官周平.子午岭森林群落土壤水分与生物量关系研究[J].西北农业学报,2007,16(5):150-154.
LIU Y, SHANGGUAN Z P. Study on the relationship between soil water content and biomass of forest communities in Ziwudian area[J]. Northwest Agricultural Science, 2007, 16 (5): 150-154. (in Chinese)

- tween soil moisture and biomass in different forest community in Ziwuling area [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2007, 16(5): 150-154. (in Chinese)
- [16] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
- LIU Z F,FU B J,LIU G H,*et al*. Soil quality:concept,indicators and its assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (3):901-913. (in Chinese)
- [17] 周萍,刘国彬,文安邦,等.黄土丘陵区不同林龄乔灌林地土壤水分及持水性能研究[J].水土保持研究,2010,17(1):188-193.
- ZHOU P,LIU G B,WEN A B,*et al*. Study on characters of soil water content and water conservation of arbor and shrub lands with different forest ages in the loess hilly-gullied region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 188-193. (in Chinese)
- [18] 田大伦,陈书军.樟树人工林土壤水文—物理性质特征分析[J].中南林学院学报,2005,25(2):1-6.
- TIAN D L,CHEN S J. Analysis of soil hydrology-physic properties in the artificial forest of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005,25(2):1-6. (in Chinese)
- [19] 高述超,田大伦,闫文德,等.长沙城市森林土壤理化性质及碳贮量特征[J].中南林业科技大学学报,2010,30(9):16-22.
- GAO S C,TIAN D L,YAN W D,*et al*. Characteristics of soil physicochemical property and its carbon storage in urban forest plantation of Changsha city[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010,30(9):16-22. (in Chinese)
- [20] 逯军峰,王辉,曹靖,等.油松人工林凋落物对土壤理化性质的影响[J].西北林学院学报,2007,22(3):25-28.
- LU J F,WANG H,CAO J,*et al*. Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007,22 (3):25-28. (in Chinese)
- [21] 肖洋,满秀玲,范金凤.公别拉河流域主要森林类型的土壤肥力与水源涵养功能的影响[J].东北林业大学学报,2006,34 (1):28-30.
- XIAO Y,MAN X L,FAN J F. Soil fertility and water conservation function of main forest types in Gongbiela River Watershed[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, 34(1). 28-30. (in Chinese)
- [22] 秦嘉海,金自学,王进,等.祁连山不同林地类型对土壤理化性质和水源涵养功能的影响[J].水土保持学报,2007,21(1): 92-94.
- QIN J H,JIN Z X,WANG J,*et al*. Influence of different type of forest land on soil physico-chemical property and function of water conservation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007,21(1):92-94. (in Chinese)
- [23] 黄昌勇,土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:291-292.
- [24] 夏汉平,余清发,张德强.鼎湖山3种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特征[J].生态学报,1997, 17(6):645-653.
- XIA H P,YU Q F,ZHANG D Q. The soil acidity and nutrient contents and their characteristics of seasonal dynamic changes under 3 different forests of Dinghushan Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17 (6): 645-653. (in Chinese)
- [25] 高雪松,邓良基,张世熔.不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J].水土保持学报,2005,19(2):53-58.
- GAO X S,DENG L J,ZHANG S R. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005,19(2):53-58. (in Chinese)
- [26] 杨承栋,张万儒.卧龙自然保护区森林土壤有机质的研究[J].土壤学报,1986,23(1):30-39.
- YANG C D,ZHANG W R. Study on the organic matter of the forest soils in Wolong Natural Reserve[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986,23(1):30-39. (in Chinese)
- [27] 奥都巴雅尔,赵鹏武,周梅,等.蒙古国达尔罕地区樟子松、白桦及其林下土壤氮、磷、钾含量研究[J].内蒙古农业大学学报,2012,33(4):65-68.
- AODUBAYAER,ZHAO P W,ZHOU M,*et al*. The study on soil and arbors nitrogen, phosphorus, potassium content of *Mongolica litv* and *Betula platyphylla* forest of Darkhan in Mongolia[J]. *Journal of Inner Mogolia Agricultural University*, 2012,33(4):65-68. (in Chinese)
- [28] CLEVELAND C C,TOWNSEND A R,SCHMIDT S K. Phosphorus limitation on microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies [J]. *Ecosystems*, 2002,5(7):680-691.
- [29] 陈雪,马履一,贾忠奎,等.影响油松人工林土壤质量的关键指标[J].中南林业科技大学学报,2012,32(8):46-51.
- CHEN X,MA L Y,JIA Z K,*et al*. Study of key indexes affecting soil quality in *Pinus tabulaeformis* plantations[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2012,32(8):46-51. (in Chinese)
- [30] 常丽新.土壤钾的生物有效性和土壤供钾能力[J].河北农业科学,2004,4(4):64-69.
- CHANG L X. Bioactivity and availability of potassium in soils [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2004, 4 (4): 64-69. (in Chinese)
- [31] 渠开跃,代力民,冯慧敏,等.辽东山区不同林型土壤有机质和NPK分布特征[J].土壤通报,2009,40(3):558-562.
- QU K Y,DAI L M,FENG H M,*et al*. Soil fertility characteristics of main forest types in eastern mountain areas of Liaoning[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009,40(3):558-562. (in Chinese)