

冀北坝上不同樟子松林的土壤养分及其与林木生长的关系

丁丽¹,许晴¹,许中旗^{1*},张菲²,张岩²,程顺²,崔同祥²

(1. 河北农业大学 林学院,河北省林木种质资源与森林保护重点实验室,河北 保定 071000;2. 塞罕坝机械林场,河北 围场 068450)

摘要:为了解冀北坝上地区樟子松人工林的土壤条件及其与生长的关系,采用典型取样方法对塞罕坝机械林场樟子松林的土壤进行了研究。结果表明,不同立地樟子松林的土壤养分含量有明显不同,各养分元素均以坝上山地壤质土和坝下山地壤质土为最高,坝上西部曼甸砂质土和坝下平地壤质土最低;坝上和坝下地区土壤养分含量总体上较为接近,但是坝下地区不同林地之间土壤养分含量的差异明显>坝上地区。樟子松林土壤中全氮、水解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的含量均随有机质的增加而增加,而且具有明显的回归关系,但回归关系的形式各不同,可基于回归关系通过有机质含量来估测其他土壤养分元素的含量。樟子松优势木树高与土壤养分含量之间没有表现出明显的正相关关系,但与土壤厚度有正的相关关系,樟子松适宜土层深厚的立地条件,而对土壤养分含量要求不高。

关键词:樟子松人工林;土壤养分;有机质;冀北坝上地区

中图分类号:S791.253 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0049-07

Soil Nutrients of Different *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantations in Northern Bashang Area of Hebei Province

DING Li¹, XU Qing¹, XU Zhong-qi^{1*}, ZHANG Fei², ZHANG Yan²,
CHENG Shun², CUI Tong-xiang²

(1. Key Laboratory of Genetic Resources of Forest and Forest Protection of Hebei Province, College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China; 2. Sanhanba Mechanical Forest Farm, Weichang, Hebei 068450, China)

Abstract: In order to understand the soil nutrients of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northern Bashang (upper dam) area of Hebei Province and the relationship between the soil nutrient conditions and the growth, typical sampling method was adopted. The main results were as follows. There were distinct differences in contents of nutrient elements among different forests in different sites, the highest content was found in loamy soil in the upper dam mountain and loamy soil in the down dam mountain, and the lowest was in sandy soil in upper dam western Mandian and in loamy soil in the flat land under dam. The contents of soil nutrients on the dam area were generally close to that of under dam, but the differences of the soil nutrient contents in different forest areas under dam were obviously greater than that on the dam area. The contents of total N available N, total P, available P, total K, available K in the soil increased with the increase of organic matter, and there was a close regression relationship between them. However, the form of the regression relationship was different. On the basis of regression relation, the contents of other soil nutrients were estimated by organic matter. It did not show a significant positive correlation between the dominant tree height and the contents of the soil nutrient, but there was a positive correlation between dominant

收稿日期:2017-03-07 修回日期:2017-04-13

基金项目:河北省林业科学技术研究应用研究类指导性计划项目“高寒山区樟子松人工林经营关键技术研究与示范(1416464);国家林业公益性行业科研专项“燕山山地典型森林类型健康经营技术”(20100400205)。

作者简介:丁丽,女,硕士研究生,研究方向:森林生态学。E-mail:lixs920528@163.com

*通信作者:许中旗,男,教授,研究方向:森林生态学。E-mail:xzq7110@163.com

height and soil thickness. In summary, *P. sylvestris* var. *mongolica* was suitable to grow in deep soil site, but the requirement for soil nutrient content was not high.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation; soil nutrient; soil organic matter; Northern Bas-hang Aera of Hebei Province

土壤是森林生态系统的重要组成部分^[1]。土壤养分含量是林分立地条件的重要组成部分,对林分的生长具有重要影响^[2-3]。已有研究表明,林分的径生长更多取决于林分的密度^[4-5],而高生长则直接取决于林分的立地条件^[6-8],土壤养分含量是立地条件的重要方面。同时,森林会通过凋落物及根系对森林土壤养分含量产生明显影响,这种影响对土壤肥力的维持至关重要^[9-10],因此了解林分土壤养分状况,尤其是人工林的土壤养分状况是森林经营的前提。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是欧洲赤松的一个地理变种,主要分布在我国的大兴安岭北部,具有生长快、成材早、抗逆性强等特性,是我国诸多松树种类中最为耐寒耐旱的树种之一,成为我国“三北”防护林工程和治沙工程的主要造林树种^[11]。位于冀北坝上地区的塞罕坝机械林场现有的樟子松人工林种植面积达1万hm²,是该地区第2大造林树种^[12]。如何实现这些樟子松人工林的合理经营已成为当地亟待解决的重要问题,这些樟子松分布在不同的立地条件下(如山地、曼甸等),其生长状况也存在明显差异^[13],了解这些樟子松人工林的土壤状况是实现其合理经营的基础。本研究以塞罕坝机械林场的樟子松人工林为对象,采用野外典型抽样调查和室内分析测定相结合的方法对该地樟子松人工林的土壤养分进行分析,探讨该地区樟子松人工林土壤养分条件的差异及其与林分生长之间的关系,

为樟子松人工林的可持续经营提供科学依据。

1 研究区概况

塞罕坝机械林场位于河北省围场满族蒙古族自治县最北部,地理位置42°02'—42°36'N、116°51'—117°39'E,地处冀北山地及蒙古高原交汇地带,地势分为坝上、坝下2部分,坝上以丘陵、曼甸为主,坝下为山地地形。该地属寒温带大陆性季风气候,春秋两季短暂而干燥,冬季漫长而寒冷。林区经常有大风、干旱、风砂、霜冻等不良天气,灾害性极大。年均气温-1.4℃,极端最高、最低气温分别为30.9℃和-42.8℃。年均日照时数2 368 h,年均无霜期60 d。年均降水量438 mm,其中6—8月占据68%,年平均降水天数134 d,年平均积雪天数169 d。年平均蒸发量1 230 mm。另外,该地区多风沙天气,年平均大风天气80 d左右。塞罕坝林区土壤类型主要为灰色森林土、山地棕壤和风砂土。塞罕坝机械林场总经营面积9.507万hm²,有林地面积7.2万hm²,树种主要为落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松、白桦(*Betula platyphylla*)等^[14]。

根据塞罕坝林区樟子松林的分布情况,将樟子松林生长的立地分为6种类型:坝上东部曼甸砂质土、坝上西部曼甸砂质土、坝上山地壤质土、坝下坡地砂质土、坝下坡地壤质土、坝下平地壤质土(表1)。

表1 样地概况

Table 1 Basic conditions of sampling plots

地点	立地类型	林分年龄/a	林分密度/(株·hm ⁻²)	海拔/m
千层板	坝上东部曼甸砂质土	9~46	417~3 637	1 489.6~1 667
三道河口	坝上西部曼甸砂质土	15~16	2 050~3 367	1 500~1 525
北曼甸	坝上山地壤质土	30~31	2 433~2 917	1 726~1 750
大唤起	坝下山地砂质土	10~44	350~1 467	1 211.2~1 451
大唤起	坝下山地壤质土	10~41	525~1 775	1 394~1 547
大唤起	坝下平地壤质土	33~35	650~667	1 046.2~1 056

2 研究方法

2.1 标准地设置

2014年7—8月,在前期调查和实地考察的基础上,针对塞罕坝林区现有的樟子松人工林林分情况,以地理条件和林分年龄为依据在大唤起林场、千层板林场、北曼甸林场、三道河口林场的樟子松林分内分别设置标准地11、12、2、2块,标准地面积根据

地形、地势、林分特征、林龄及林分面积而定,一般为600 m²(20 m×30 m),个别样地面积为400 m²(20 m×20 m)。

2.2 样地调查

在设立的样地内进行每木检尺,调查胸径、树高、林龄及冠幅。然后,选取12块林龄相近和立地条件有代表性的样地。其中,大唤起5块,千层板6块,北曼甸1块。在每块样地内选择处于林冠上层、

生长状况良好、无病虫害、不断梢的优势木,伐倒,进行树干解析,通过树干解析分析其高生长过程。

2.3 土壤的采集与处理

在每一样地内,分别挖取2个土壤剖面,深至30 cm,然后进行分层取样,每10 cm一层。将2个剖面的同一层的土壤混合均匀,取每层1 kg左右的混合样品装入布质土壤袋中,带回室内备用。将野外采集的土壤样品阴干后,拣出枯枝落叶、植物根、石子等,然后碾碎,使之通过1.00 mm土壤筛,装入密封袋成待测样品。

2.4 土壤养分分析

在实验室对土壤样品进行理化性质分析,主要测定土壤有机质、pH、碱解N、速效P、速效K、全N、全P、全K等。应用的主要分析方法有:有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法,碱解氮用碱解扩散吸收法,全氮用半微量凯氏定氮法,速效磷用碳酸氢钠浸提法,全磷用钼锑抗比色法,速效钾采用NH₄OAc浸提,使用火焰光度计测定;全钾采用火焰光度计法^[15]。

2.5 数据分析

使用Excel 2013进行数据统计,SPSS 17.0进行回归分析。

3 结果与分析

3.1 不同樟子松林土壤养分含量及pH的比较

塞罕坝地区樟子松人工林的6种立地类型的土壤养分含量见表2。由表2可知,樟子松人工林的土壤养分在不同立地间呈现出相似的变化规律。各养分元素含量都以坝上山地壤质土和坝下山地壤质土为最高,其次为坝上东部曼甸和坝下山地砂质土,坝上西部曼甸砂质土和坝下平地壤质土最低。以有机质为例,坝上山地壤质土和坝下山地壤质土表层(0~10 cm)土壤有机质的含量分别为61.31 g·kg⁻¹和65.64 g·kg⁻¹,坝上东部曼甸砂质土和坝下山地砂质土分别为33.81 g·kg⁻¹和27.61 g·kg⁻¹,坝上西部曼甸砂质土和坝下平地壤质土则分别为21.06 g·kg⁻¹和17.64 g·kg⁻¹。

表2 不同樟子松林地的土壤养分含量及pH值

Table 2 Soil nutrients and pH for different woodland of *P. sylvestris* var. *mongolica*

类型	土层 /cm	有机质 /(g·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	速效磷 /(mg·kg ⁻¹)	全钾 /(g·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	pH值
坝上东部 曼甸砂质土	0~10	33.81(11.46)	0.20(0.07)	153.33(41.38)	0.20(0.04)	84.68(24.65)	7.65(0.68)	210.92(24.20)	5.77(0.32)
	10~20	19.52(9.71)	0.15(0.08)	97.68(40.80)	0.16(0.05)	60.18(25.44)	6.61(0.97)	151.56(19.42)	5.70(0.29)
	20~30	16.20(0.85)	0.14(0.07)	81.91(33.38)	0.14(0.04)	47.65(17.44)	6.17(1.16)	126.37(15.72)	5.84(0.22)
坝上西部 曼甸砂质土	0~10	21.06(3.82)	0.14(0.00)	114.74(14.14)	0.17(0.01)	55.07(6.59)	8.19(0.32)	237.87(26.16)	6.35(0.08)
	10~20	10.76(1.89)	0.12(0.02)	66.79(20.84)	0.12(0.04)	29.48(2.28)	5.39(2.62)	111.43(4.59)	6.46(0.16)
	20~30	8.82(5.56)	0.12(0.01)	55.17(32.07)	0.11(0.07)	26.44(4.66)	4.94(3.11)	119.77(31.89)	6.64(0.16)
坝上山 地壤质土	0~10	61.31(4.67)	0.30(0.01)	272.42(18.14)	0.27(0.03)	118.14(1.77)	9.54(0.37)	278.41(46.39)	6.05(0.03)
	10~20	41.24(5.89)	0.21(0.02)	196.75(13.85)	0.23(0.02)	53.55(10.64)	8.99(0.49)	245.72(31.01)	5.80(0.02)
	20~30	34.26(7.16)	0.17(0.01)	154.18(20.91)	0.21(0.03)	55.57(4.56)	8.99(0.46)	212.22(19.17)	5.80(0.02)
坝下山 地砂质土	0~10	27.61(10.84)	0.19(0.06)	122.97(44.09)	0.24(0.07)	34.19(7.55)	8.24(0.71)	191.46(46.30)	5.82(0.24)
	10~20	21.63(11.23)	0.13(0.04)	104.45(51.37)	0.21(0.08)	28.77(12.98)	7.79(0.95)	133.05(21.42)	5.98(0.22)
	20~30	20.70(13.48)	0.13(0.04)	97.85(53.66)	0.20(0.10)	25.13(10.23)	7.26(1.50)	137.50(34.82)	5.91(0.23)
坝下山 地壤质土	0~10	65.64(2.33)	0.40(0.17)	274.56(3.35)	0.32(0.08)	90.27(7.52)	10.11(0.01)	247.59(35.74)	6.05(0.18)
	10~20	57.77(12.73)	0.32(0.13)	207.33(10.87)	0.28(0.01)	56.33(0.36)	9.71(0.03)	206.96(55.60)	5.81(0.32)
	20~30	37.26(0.46)	0.28(0.11)	168.74(5.46)	0.24(0.00)	48.48(2.87)	9.25(0.65)	185.30(58.77)	5.74(0.24)
坝下平 地壤质土	0~10	17.64(0.89)	0.14(0.01)	90.82(9.90)	0.17(0.00)	21.38(8.24)	7.52(0.28)	180.04(20.80)	5.27(0.07)
	10~20	9.80(5.97)	0.11(0.02)	67.92(31.96)	0.11(0.05)	18.09(5.01)	6.28(0.15)	133.12(13.02)	5.58(0.11)
	20~30	9.40(4.71)	0.11(0.02)	54.48(24.66)	0.12(0.05)	32.78(2.15)	6.27(0.46)	102.18(8.94)	5.74(0.30)

注:括号中的数据为标准差。

总的规律是壤质土的土壤养分含量都相对较高,而砂质土则相对较低,这是由于壤质土土壤质地

更细,对土壤养分元素的吸附能力更强,有更高的养分保持能力,而砂质土保持养分的能力则相对较

低^[16]。坝下平地壤质土的土壤养分含量较低的原因主要由于该林地临近居民区,林内干扰(比如放牧等)比较严重,影响了土壤养分的积累。不同樟子松林的不同立地之间 pH 值没有明显差异,均在 5.17 ~ 6.68,土壤呈酸性。

塞罕坝樟子松林地中各种土壤养分含量都随土层深度的增加而呈逐渐下降的趋势,这符合一般森林土壤养分含量的分布格局。因为森林土壤的养分主要来源于地上凋落物的分解及土壤中根系的周转。随凋落物分解而进入土壤的养分随深度的增加逐渐减少,同时,根系在土壤中的分布也随土壤深度的增加逐渐减少,2 种因素共同作用使得土壤养分

含量随土壤深度的增加而呈下降趋势。而 pH 值则与土壤的深度没有明显的相关关系。

另外,根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[17],各樟子松林土壤养分含量都属于中等以上水平,说明该地区樟子松林的土壤肥力状况相对较好。

3.2 坝上与坝下樟子松林土壤养分含量及 pH 的比较

樟子松人工林在塞罕坝机械林场的坝上和坝下地区都有分布。坝上及坝下地区樟子松人工林土壤养分及 pH 值见表 3。总体来看,除速效磷外,各种坝上及坝下地区樟子松人工林的土壤养分含量较为接近(表 3)。

表 3 坝上与坝下樟子松林土壤养分含量及 pH 的比较

Table 3 Soil nutrients and pH for *P. sylvestris* var. *mongolica* in upper dam and down dam

地点	项目	有机质 /(g · kg ⁻¹)	全氮 /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg · kg ⁻¹)	全磷 /(g · kg ⁻¹)	速效磷 /(mg · kg ⁻¹)	全钾 /(g · kg ⁻¹)	速效钾 /(mg · kg ⁻¹)	pH 值
坝上	平均值	29.35	0.18	138.78	0.19	69.27	7.32	188.66	5.88
	标准差	14.47	0.07	60.40	0.06	24.14	1.62	43.88	0.37
	最大值	56.56	0.34	250.58	0.33	127.51	9.69	300.76	6.68
	最小值	6.88	0.10	39.23	0.06	25.18	2.75	102.03	5.17
	变异系数	0.49	0.40	0.44	0.34	0.35	0.22	0.23	0.06
坝下	平均值	26.55	0.18	120.77	0.20	36.44	7.41	170.41	5.88
	标准差	20.24	0.11	72.37	0.09	19.68	2.17	41.65	0.37
	最大值	67.03	0.47	245.00	0.34	75.84	9.93	259.57	6.66
	最小值	1.31	0.08	22.65	0.03	15.05	2.27	85.38	5.41
	变异系数	0.76	0.58	0.60	0.46	0.54	0.29	0.24	0.06

另外,尽管坝上和坝下地区土壤养分含量总体上较为接近,但是坝下地区樟子松人工林不同林地之间土壤养分含量的差异明显>坝上地区。坝上地区各土壤养分含量的变异系数分别为 0.49、0.40、0.44、0.34、0.35、0.22、0.23 和 0.06,而坝下分别为 0.76、0.58、0.60、0.46、0.54、0.29、0.24 和 0.06。这主要是因为坝上地区为高原,地势较为平坦,各林分之间的立地条件差异相对较小,而坝下地形为山地,地势起伏变化比较大,立地条件的空间变异较大,因此坝下不同樟子松人工林土壤之间的差异相对较大。

3.3 不同养分元素与土壤有机质的关系

由图 1 可以看出,各种养分元素都随土壤有机质含量的增加而增加。土壤全氮及水解氮含量与土壤有机质均为显著的直线回归关系,全氮、水解氮与土壤有机质的回归关系的决定系数分别达到了 0.807 和 0.973 1,说明二者与土壤有机质的关系非常密切,土壤有机质对全氮及水解氮的变化解释量分别达到了 80.7% 和 97.31%。全磷与土壤有机质的关系为幂函数关系,决定系数也达到了 0.876 5,

而速效磷与土壤有机质的关系为直线,决定系数为 0.382 7。全钾与土壤有机质的关系为对数函数关系,决定系数达到了 0.875 2,而速效钾与有机质的关系为幂函数关系,决定系数也达到了 0.765,说明钾元素与土壤有机质也有明显的相关关系。以上结果说明,各种养分元素含量与有机质都有紧密的数量关系,只是数量关系的形式不同,即各养分元素与有机质均有不同程度的正相关关系,随有机质含量的升高而升高,但各养分含量变化的程度却各不相同。有机质与全氮、速效氮、全磷、全钾、速效钾都为显著相关,这说明土壤有机质含量的高低在一定程度上代表着全氮、速效氮、全磷、全钾、速效钾含量的高低。因此,土壤有机质水平可作为衡量土壤养分状况的指标,通过有机质含量的测定就可以判断其总体养分含量的水平。

另外,从图中可以看出,土壤 pH 值随土壤有机质含量的增加呈逐渐下降的趋势。这可能是因为樟子松为常绿针叶树,其凋落物含有较多的酸性物质,土壤有机质含量越高,其 pH 越低。

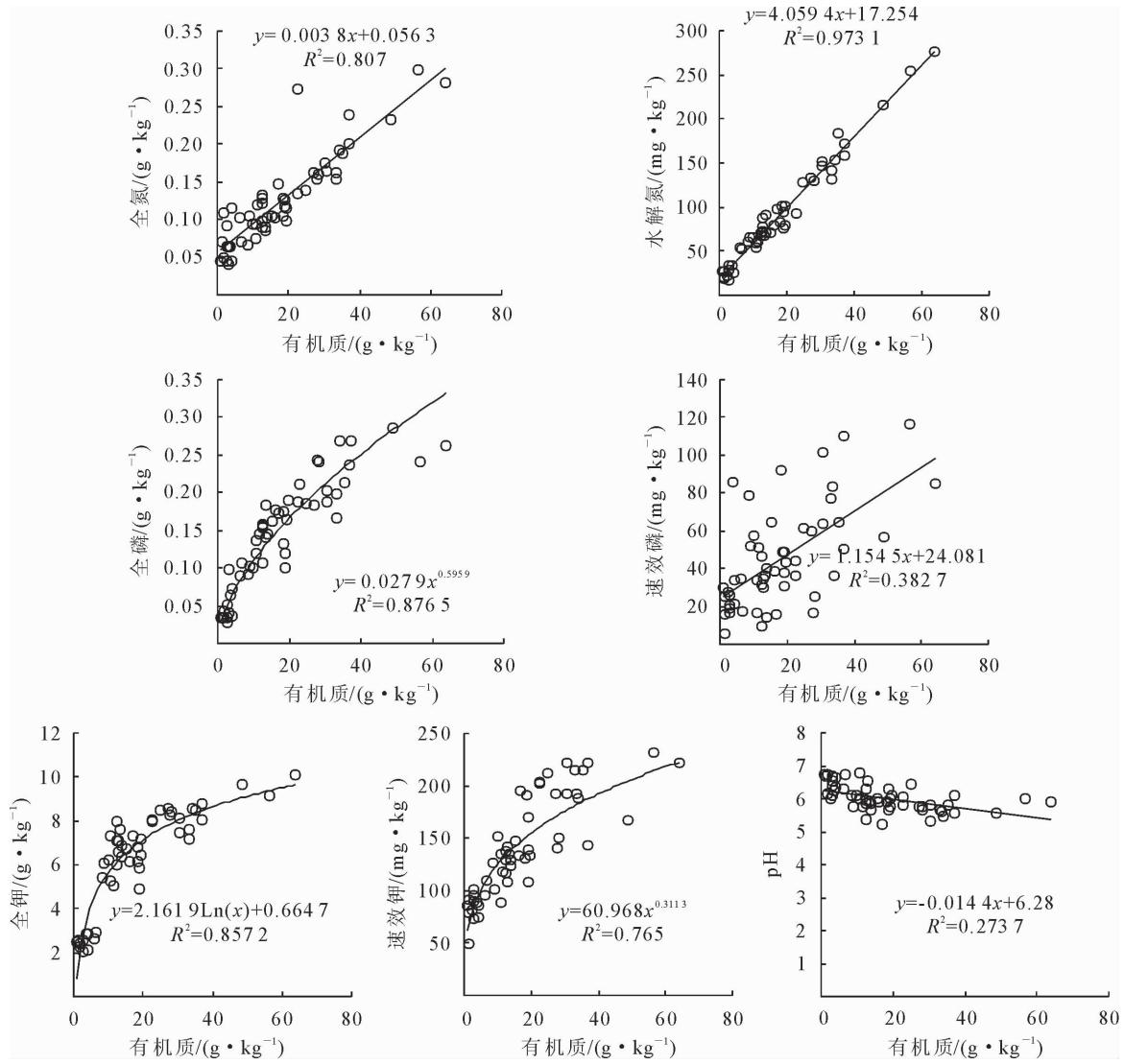


图1 不同土壤养分及pH值与土壤有机质的关系

Fig. 1 The correlation between organic matter and N, P, and K contents

3.4 樟子松高生长与土壤养分的关系

树高受林分密度的影响较小,因此树高生长能够反映立地条件的优劣^[18-19]。塞罕坝地区樟子松人工林20 a优势木树高与0~30 cm土层养分含量的相关关系见图2,可以看出,20 a优势木树高与各种土壤养分含量都没有表现出明显的相关性,这说明,该地区樟子松的高生长受土壤养分含量的影响较小。这与土壤养分含量越高、立地条件越好,而林木高生长越大的观点有所不同。其原因在于:一是林木的生长受多种因素的影响,除受土壤养分的影响之外,还受地形、土壤质地及水分等诸多生态因子的影响;二是樟子松是耐贫瘠树种^[20],所调查林地土壤中,即使是养分元素含量较低的土壤,也能满足樟子松生长对养分元素的要求。

同时,从图2也可以看出,樟子松的生长与土层厚度存在正的相关关系,说明土层越厚,樟子松的高生长量越大。说明对樟子松来说,土层厚度是比土

壤养分含量更为重要的指标,也说明了樟子松适宜深厚的土壤,即使是养分含量较低的土壤。邱贵福^[21]对张家口地区不同立地条件的樟子松生长的研究也表明,阳坡厚层土上的樟子松生长量最大^[21]。这也在一定程度上说明了为什么樟子松多分布于土壤养分含量并不十分丰富的砂地上。因此,樟子松人工造林应该选择土层深厚的立地条件。

4 结论与讨论

塞罕坝地区樟子松林土壤不同养分元素在各林分之间的变化呈现出相同的规律,都以坝上山地壤质土和坝下山地壤质土为最高,其次为坝上东曼甸砂质土和坝下山地砂质土,坝上西部曼甸砂质土和坝下平地砂质土最低。同时,不同林分之间,土壤pH值和全钾含量的差别相对较小,而其他养分元素差异则相对较大。

塞罕坝地区坝上和坝下地区土壤养分含量总体

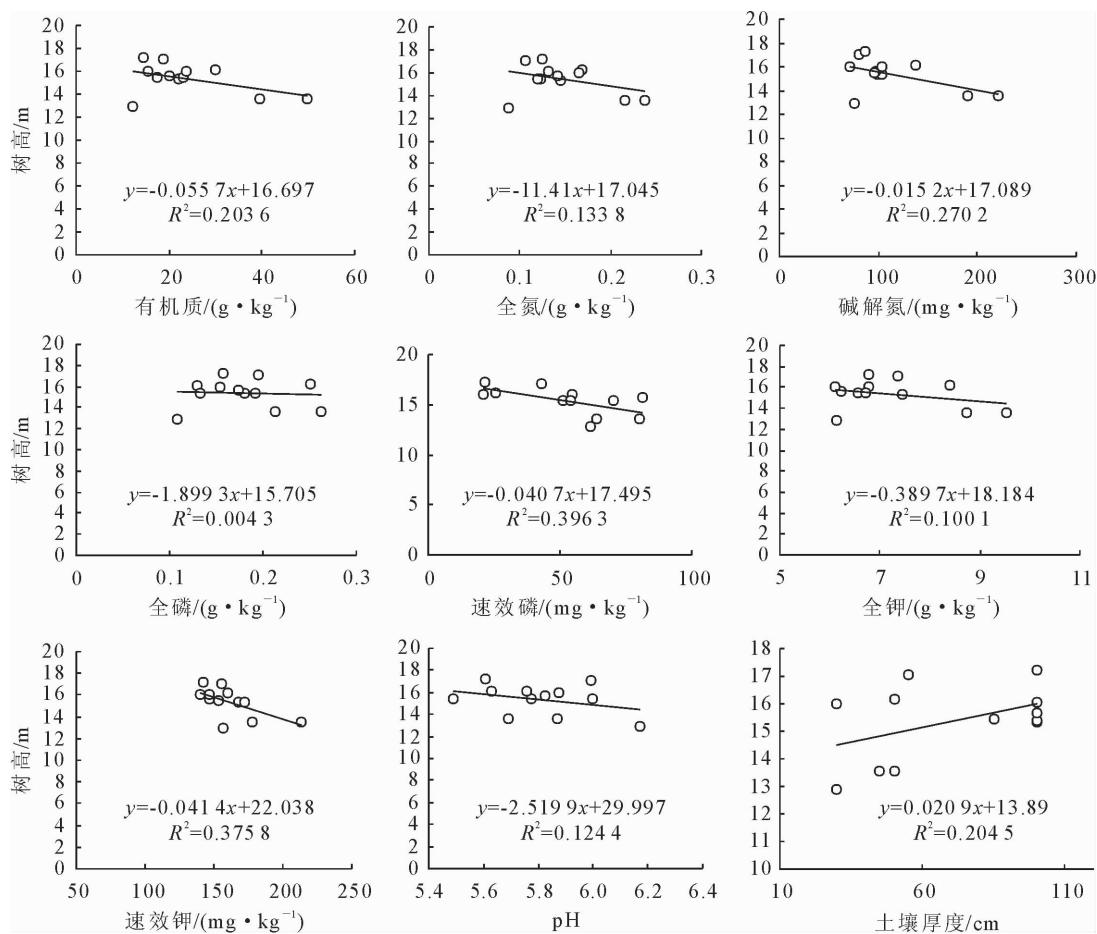


图 2 树高与土壤养分的相关关系

Fig. 2 Correlation between soil nutrients and height

上较为接近,但是坝下地区樟子松人工林不同林地之间土壤养分含量的差异明显>坝上地区。

樟子松林土壤中全氮、水解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的含量均随有机质的增加而增加,而且具有紧密的回归关系,但回归关系的形式各不同。可基于回归关系通过有机质来估测其他土壤养分元素的含量。

樟子松优势木树高与土壤养分含量之间没有表现出明显的正相关关系,但优势木树高与土壤厚度有正的相关关系,樟子松适宜土层深厚的立地条件,而对土壤养分含量要求不高。

参考文献:

- [1] 林文树,穆丹,王丽平,等.针阔混交林不同演替阶段表层土壤理化性质与优势林木生长的相关性[J].林业科学,2016,52(5):17-25.
LIN W S, MU D, WANG L P, et al. Correlation between the growth of dominant trees and surface soil physicochemical properties of conifer and broad-leaved mixed forest at different succession stages[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(5): 17-25. (in Chinese)
- [2] 王琳琳,陈立新,刘振花,等.红松阔叶混交林不同演替阶段土

壤肥力与林木生长的关系[J].中国水土保持科学,2008,6(4):59-65.

WANG L L, CHEN L X, LIU Z H, et al. Relationship between soil fertility and tree growth in the broad-leaved *Pinus koraiensis* forest at different growth periods[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(4): 59-65. (in Chinese)

- [3] 李晓莎,许晴,许中旗,等.冀北山地华北落叶松人工林土壤养分的变化规律[J].西北林学院学报,2016,31(5):23-28.
LI X S, XU Q, XU Z Q, et al. Changes of soil nutrients for *Larix principis-rupprechtii* plantation in north mountain of Hebei[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 23-28. (in Chinese)
- [4] 刘素真,孙玉军.土壤养分与杉木生长的相关性研究[J].西北林学院学报,2015,30(5):15-19.
LIU S Z, SUN Y J. Correlation between soil nutrients and the growth of Chinese fir[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 15-19. (in Chinese)
- [5] 韩照日格图,白静,田有亮,等.大青山区油松人工林密度对林木生长影响的研究[J].内蒙古农业大学学报,2007,28(4):67-70.
HAN Z R G T, BAI J, TIAN Y L, et al. Influence of the density of the artificial forest of *Pinus tabulaeformis* in Daqing mountain on the growth of the forest[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2007, 28(4): 67-70. (in Chinese)

- [6] 刁淑清,沈海龙,潘建中,等.樟子松人工幼林密度与个体生长指标的关系[J].东北林业大学学报,2005,33(6):4-7.
DIAO S Q, SHEN H L, PAN J Z, et al. Relationship between Individual growth index and stand density of young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2005, 33(6): 4-7. (in Chinese)
- [7] 孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,1996.
- [8] 孙圆,程小义,余光辉.江苏省南方型黑杨立地指数表的编制[J].南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(1):29-32.
SUN Y, CHENG X Y, SHE G H. Establishment of site index table for black poplar in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2006, 30(1): 29-32. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 罗献宝,张颖清,徐浩,等.温带阔叶红松林中不同树种和倒木对土壤性质的影响[J].生态环境学报,2011,20(12):1841-1845.
LUO X B, ZHANG Y Q, XU H, et al. Effects of tree species and fallen trees on the soil properties in a temperate korean pine and broad-leaved mixed forest[J]. Ecology and Environment, 2011, 20(12): 1841-1845. (in Chinese)
- [11] 刘明国,苏芳莉,马殿荣,等.多年生樟子松人工纯林生长衰退及地力衰退原因分析[J].沈阳农业大学学报,2002,33(4):274-277.
LIU M G, SU F L, MA D R, et al. Decline reasons of pure *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and soil fertility[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(4): 274-277. (in Chinese)
- [12] 刘晓兰.塞罕坝地区樟子松人工林生长规律及经济效益分析[J].安徽农学通报,2004(1):118-121.
LIU X L. Analysis of economic benefits and growth law for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Saihanba area [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2004(1): 118-121. (in Chinese)
- [13] 楚聪颖.塞罕坝地区樟子松人工林生长规律及其土壤养分[D].保定:河北农业大学,2015.
- [14] 黄金祥,李信,钱进源.塞罕坝植物志[M].北京:中国科学技术出版社,1996:1-30.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 张芳芳,张丽萍,王文艳,等.水蚀风蚀交错区土壤养分特征与土壤质地及水分关系[J].水土保持学报,2012,26(2):99-104.
ZHANG F F, ZHANG L P, WANG W Y, et al. Relationships between characteristic of soil nutrients and soil texture and moisture in wind-water erosion crisscross region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 99-104. (in Chinese)
- [17] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [18] 韩有志,铁梅,王月娥,等.太行山林区中部土壤养分对油松人工林生长的影响[J].山西农业大学学报,1998,18(1):10-13.
HAN Y Z, TIE M, WANG Y E, et al. Effects of soil nutrients on the growth of *Pinus tabulaeformis* plantation in the middle of Taihang mountain areac[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 1998, 18(1): 10-13. (in Chinese)
- [19] 蒋德明,曹成有,押田敏雄.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林防风固沙及改良土壤效应研究[J].干旱区研究,2008,25(4):653-658.
JIANG D M, CAO C Y, TOSHIO OSHIDA. Study on the effects of protection against wind, sand-fixation and soil improvement of *Caragana microphylla* plantations in Horqin sand land[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 653-658. (in Chinese)
- [20] 沈海龙,李世文,胡详一,等.东北东部山地樟子松生长与气候因子的相关分析[J].东北林业大学学报,1995,23(3):33-39.
SHEN H L, LI S W, HU X Y, et al. Correlation analysis between climatic factors and the growth of *Pinus sylvestris* in eastern mountainous region of northeast China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(3): 33-39. (in Chinese)
- [21] 邱贵福.张家口坝缘山地樟子松适生立地初步研究[J].内蒙古林业科技,2012,38(1):8-13.
QIU G F. Suitable site for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. in the southern mountains of bashang plateau in Zhangjiakou[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2012, 38(1): 8-13. (in Chinese)