

广西大青山西南桦人工林土壤养分特征及其与立地生产力的关系

唐 诚^{1,2}, 王春胜², 庞圣江³, 王 欢², 曾 杰^{2*}

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520;
3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西 凭祥 536000)

摘要: [目的] 探讨西南桦人工林对土壤的适应性及土壤养分特征, 揭示土壤养分状况与立地生产力的关系, 为其造林地选择及人工林养分管理提供参考。 [方法] 在广西大青山林区西南桦人工林内设置 47 块 600 m² 的典型样地, 调查常规测树因子, 采集土壤样品, 测定 10 项常规土壤化学性质指标; 按照土壤养分分级标准评价土壤养分状况, 基于立地指数将样地分为高产和低产组, 进一步比较分析两组立地间各养分指标的差异性, 探讨土壤养分对立地生产力的影响。 [结果] 表明: 广西大青山西南桦人工林地土壤绝大部分为强酸性, 有机质、有效 N、全 N 含量中等偏上, 有效 P 甚缺, 其它养分含量中等偏下。 高产和低产立地间土壤有机质和全 K 含量均呈极显著差异 ($P < 0.01$), 有效 N 含量差异显著 ($P < 0.05$)。 [结论] 西南桦对于低 pH 值、低 P 含量的土壤具有较强的适应性; 有机质、全 K 和有效 N 含量是影响广西大青山西南桦人工林立地指数的关键土壤养分因子。

关键词: 西南桦人工林; 土壤养分特征; 土壤适应性; 立地指数

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0164-06

Assessing Soil Nutrient Status and Its Relationship with Site Productivity of *Betula alnoides* Plantations in Daqingshan Mountains, Guangxi

TANG Cheng^{1,2}, WANG Chun-sheng², PANG Sheng-jiang³, WANG Huan², ZENG Jie²

(1. Agricultural College of Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;

2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;

3. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 536000, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] The soil nutrient status in *Betula alnoides* plantation was investigated to assess the soil fitness of the species and reveal the relationship between soil nutrient regimes and site productivity so as to provide reference for site selection and soil nutrients management of *B. alnoides* plantation. [Method] Forty-seven plots with size of 600 m² were established in *B. alnoides* plantations in Daqingshan Mountains, Guangxi. Three soil samples were collected in each plot and their soil chemical properties were analyzed, the soil nutritional status was evaluated according to the classification standard of soil nutrition. The plots were then divided into two site groups with high and low productivity based on their site index, and the differences in soil nutrition were further analyzed between the site groups. [Result] The soil in majority of *B. alnoides* plantation was strongly acidic. The soil organic matter and nitrogen contents were in upper-middle class, the available phosphorus was of heavy shortage, and the contents of other nutrients were in lower-middle class. The soil organic matter and total potassium contents were significantly different at the level of 0.01, and the available nitrogen content at the level of 0.05 between high and low produc-

收稿日期: 2017-11-05

基金项目: 国家重点研发计划课题“西南桦高效培育技术研究”(2016YFD0600604)

作者简介: 唐 诚(1978—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 讲师, 主要从事森林培育及经营的教学与研究。E-mail: tangcheng1983@163.com

* 通讯作者: 曾 杰。E-mail: zengj69@caf.ac.cn

tivity sites. [Conclusion] *B. alnoides* has strong adaptability to soils with low pH value and phosphorus contents. The organic matter, total potassium and available nitrogen contents are the key soil nutrient factors influencing the productivity of *B. alnoides* plantations in Daqingshan Mountains.

Keywords: *Betula alnoides* plantation; soil nutrient characteristics; soil fitness; site index

土壤养分影响林木生长、林分生产力^[1-2]。在土耳其地中海地区,黎巴嫩雪松(*Cedrus libani* Rich.)的树高与土壤 pH 值呈负相关,而与土壤 Mn、Cu 和 K 含量呈正相关^[3];湖北江汉平原栽培的杨树,其胸径和树高生长受土壤 Zn 和 N 含量的显著影响^[4]。在用材林造林决策和经营管理过程中,获取最大的立地生产力是重要的目标之一^[5]。立地指数常作为评价立地生产力大小的指标^[6],其受土壤养分的影响因树种而异:如无梗花栎(*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.)的立地指数与土壤 Mg、S 含量以及 K/P₂O₅ 和 Mg/K 密切相关,而与 C/N 相关不显著^[7];韩国西海岸生长的黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)其立地指数受土壤 Ca-P 含量的显著影响^[8];西班牙西北部土壤速效 K 含量与辐射松(*P. radiata* D. Don)立地指数间呈显著正相关^[9]。对于同一树种而言,影响立地指数的养分因子因栽培区域而异:如苏格兰东北部的北美云杉(*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière),其立地指数受表层土壤全 N 和全 P 含量的显著影响^[10];而在阿拉斯加东南部,土壤有机 C 含量与北美云杉立地指数间呈显著正相关^[11]。研究土壤养分与立地指数间的关系对于造林决策、无林地立地生产力估算等具有重要意义^[12]。

西南桦(*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)是热带、亚热带地区的一个速生珍贵用材树种,其木材材质优良,用途广泛,市场需求大。目前,西南桦在广西、云南等省区均大规模种植,其人工林面积已逾 15.0 万 hm²^[13]。在西南桦人工林快速发展过程中,由于立地选择不当、经营管理粗放等诸多原因,造成大量西南桦林分生产力低下。尽管影响西南桦林分生产力的因素复杂多样,林地土壤养分状况无疑是一个至关重要的因素。广西大青山林区为西南桦栽培最早的地区,本研究以其西南桦人工林为研究对象,设置典型样地开展林木生长调查与土壤养分测定,系统分析其林地土壤养分状况,探讨西南桦的土壤适应性,揭示土壤养分与立地生产潜力间的关系,为西南桦造林地选择、养分管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心(106°47′~53′ E, 22°02′~06′ N),属南亚热带季风气候区,年均气温 19.5~21.5℃,年降水量 1 200~1 550 mm,干湿季分明,每年 4 月至 9 月为雨季,10 月至翌年 3 月为干季,相对湿度基本在 80% 以上。研究区海拔 190~680 m,土壤类型主要为砖红壤性红壤和红壤。

2 研究方法

2.1 样地设置及土壤样品采集与测定

考虑不同年龄、坡向、坡位等因素,在热带林业实验中心的青山、白云和伏波 3 个实验场西南桦人工林内分别设置 17、14、16 块 600 m² 的典型样地,并进行海拔、坡向等立地因子调查及常规生长测定。各样地的地形因子和林分年龄见表 1。

在每个样地的对角线上设置 3 个 5 m×5 m 的样方,每个样方挖取 1 个土壤剖面,取 0~30 cm 土壤约 1 kg 带回实验室,按国家林业局土壤养分分析标准制样并测定土壤 pH 值及有机质、全 N、全 P、全 K、有效 N、有效 P、速效 K、交换性 Mg、活性 Al 的含量^[14]。

2.2 土壤养分分级标准

依据全国第二次土壤普查养分分级标准进行土壤养分分级^[15]。

2.3 立地分组及其土壤养分差异性分析

每个样地的立地指数来自文献[16]中的“广西热林中心西南桦人工林立地指数表”。根据样地调查资料,每个样地选取 5 株优势木或亚优势木求其平均高,查表获得其立地指数(表 1)。

西南桦喜温凉气候,偏低海拔立地会因为温度高而影响西南桦生长^[17],由表 1 亦可以看出,海拔小于 300 m 的 11 个样地,其立地指数普遍偏小。300 m 以上海拔较适宜西南桦生长,因此,在分析土壤养分特征与立地生产力的关系时仅针对海拔 300 m 以上的样地。35 个样地的立地指数介于 16 m 与 28 m 之间,其均值约为 20 m。据此将立地分为两

类:大于20为高产组,小于或等于20为低产组(表2)。采用独立样本 t 检验比较高产组和低产组之间

各土壤养分的均值及其差异显著性。数据处理与分析均采用SPSS 22.0软件进行。

表1 西南桦人工林样地概况

Table 1 General situations of the plots in *Betula alnoides* plantations

样地号 Plot No	林龄 Age/a	海拔 Altitude/m	SA	SP	SG/(°)	SI	样地号 Plot No	林龄 Age/a	海拔 Altitude/m	SA	SP	SG/(°)	SI
b1	14	670	SHA	U	28.0	20	f14	13	640	SHA	U	37.0	20
b2	14	670	SHA	U	16.0	18	f15	13	640	SSHA	U	34.0	22
b3	14	670	SHA	U	28.0	18	f16	15	440	SSUN	M	31.0	18
b4	17	460	SSHA	M	36.0	20	f18	15	440	SSUN	M	31.0	18
b5	17	460	SSHA	M	37.0	24	f21	16	480	SHA	M	28.0	20
b6	17	455	SSHA	M	39.0	22	f23	16	480	SHA	M	32.0	20
b7	17	564	SSUN	M	14.0	20	q1	12	230	SHA	U	14.0	18
b8	17	485	SUN	M	31.0	18	q2	12	230	SHA	U	9.0	18
b9	17	485	SUN	M	32.0	16	q3	12	230	SHA	U	23.0	18
b10	17	390	SSUN	L	37.0	18	q4	13	190	SHA	U	15.0	18
b11	17	390	SSUN	L	28.0	18	q5	13	190	SHA	U	22.0	20
b12	17	400	SUN	M	22.0	16	q6	13	190	SHA	U	26.0	18
b13	17	400	SUN	L	28.0	20	q7	20	260	SSUN	U	23.0	20
b14	17	405	SUN	L	34.0	22	q8	20	240	SSUN	U	21.0	18
f1	14	460	SSUN	L	39.0	22	q9	20	250	SUN	U	25.0	20
f2	14	460	SHA	L	34.0	26	q10	20	250	SUN	U	21.0	20
f3	14	460	SHA	L	26.0	24	q11	20	250	SUN	U	21.0	18
f4	14	460	SHA	L	24.0	26	q12	20	240	SUN	U	18.0	18
f7	24	600	SSUN	U	36.0	22	q14	12	523	SSUN	M	37.0	16
f8	24	600	SHA	U	32.0	18	q15	12	500	SSUN	M	37.0	16
f9	24	600	SHA	U	42.0	20	q16	12	550	SSUN	M	34.0	20
f11	13	640	SUN	U	28.0	16	q17	12	550	SUN	M	32.0	22
f12	13	640	SUN	U	31.0	20	q18	12	550	SUN	M	31.0	20
f13	13	640	SSUN	M	32.0	28							

注:SA、SP、SG、SI 分别表示坡向、坡位、坡度和立地指数;b、f、q 分别表示白云、伏波和青山实验场;SUN、SSUN、SHA、SSHA 分别表示阳坡、半阳坡、半阴坡和阴坡;U、M、L 分别表示上、中和下坡位。

Note:SA, SP, SG, SI represent slope aspect, slope position, slope gradient and site index; b, f, and q represent Baiyun, Fubo and Qingshan Experimental Stations; SUN, SSUN, SHA and SSHA represent sunny, semi-sunny, shade and semi-shade slopes; and U, M and L represent upper, middle and lower slopes, respectively.

表2 广西大青山中高海拔35个西南桦人工林样地的立地分组

Table 2 Site group division for 35 plots in *Betula alnoides* plantations of medium to high altitudes at Daqing Mountain, Guangxi

立地分组 Site groups	样地数 Plot number	样地号 Plots code	立地指数(均值 SD) SI (Mean SD)	显著性 Sig.
HPS	11	b5, b6, b14, f1, f2, f3, f4, f7, f13, f15, f17	23.64 ± 2.16	
LPS	24	b1, b2, b3, b4, b7, b8, b9, b10, b11, b12, b13, f8, f9, f11, f12, f14, f16, f18, f21, f23, q14, q15, q16, q18	18.50 ± 1.59	0.000

注:HPS和LPS 分别表示高产和低产立地,下同。

Note: HPS and LPS represent site with high and low productivity, respectively. The same below.

3 结果与分析

3.1 土壤养分特征

依据全国第二次土壤普查养分分级标准,广西

大青山西南桦人工林地土壤为强酸性;其有机质、有效N、全N含量高;速效K、全P、交换性Mg缺乏;有效P、全K甚缺(表3)。各土壤化学性质指标变异系数的变化范围为0.04~1.02,pH值的变异性最

弱,全 K 含量的变异性最强(表 3)。

从表 3 亦发现:大部分养分含量的最小值和最大值相差几倍至十几倍,仅以均值并不能全面反映出林地土壤各养分丰缺程度。进一步分析各样地土壤养分含量的分布频率(表 4)可知:90% 以上样地属于强酸性土壤;绝大部分样地的土壤有机质、有效 N、全 N 含量处于中等偏上水平;所有样地土壤有效 P 甚缺,全 P、全 K、速效 K、交换性 Mg 含量中等偏下。

3.2 土壤养分因子与立地指数间的关系

由表 5 可知:高产和低产组两类立地间土壤有机质和全 K 含量呈极显著差异($P < 0.01$),有效 N 含量差异显著($P < 0.05$),速效 K 含量在 0.1 水平上差异显著($P = 0.076$),其它养分指标均差异不显著($P \geq 0.05$)。

表 3 广西大青山西南桦人工林 47 个样地土壤化学性质特征
Table 3 Chemical properties of soils in 47 sampling plots of *Betula alnoides* plantations at Daqing Mountain, Guangxi

因子 Regimes	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 S. D	变异系 数 CV
pH (H ₂ O)	3.93	4.67	4.21	0.19	0.04
OM/(g·kg ⁻¹)	16.54	89.40	37.60	13.87	0.37
AN/(mg·kg ⁻¹)	64.38	324.27	134.61	52.36	0.39
AP/(mg·kg ⁻¹)	0.78	2.24	1.38	0.36	0.28
AK/(mg·kg ⁻¹)	6.27	89.66	44.64	21.22	0.48
TN/(g·kg ⁻¹)	0.68	2.91	1.52	0.43	0.28
TP/(g·kg ⁻¹)	0.11	0.69	0.34	0.13	0.37
TK/(g·kg ⁻¹)	0.76	15.78	4.58	4.65	1.02
EMg/(cmol·kg ⁻¹)	0.07	1.03	0.27	0.18	0.66
AAL/(g·kg ⁻¹)	15.77	57.75	35.22	12.54	0.36

注:OM、AN、AP、AK、TN、TP、TK、EMg、AAL 分别表示有机质、有效 N、有效 P、速效 K、全 N、全 P、全 K、交换性 Mg 和活性 Al 含量;下同。

Note: OM, AN, AP, AK, TN, TP, TK, EMg and AAL refer to contents of organic matter, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, exchangeable magnesium and active aluminum, respectively. The same below.

表 4 广西大青山西南桦人工林土壤养分指标分布频率

Table 4 Frequency distribution of soil nutrients in sampling plots of *Betula alnoides* plantations at Daqing Mountain, Guangxi

项目 Item	丰 Rich (碱 Alkali)0	高 High (微碱 Subalkaline)0	中 Middle (中性 Neutral)0	低 Low (微酸 Micro acid)0	缺 Deficient (酸 Acid)8.5	甚缺 More deficient (强酸 Strongly acid)91.5	%
pH (H ₂ O)							
OM	38.3	29.8	29.8	2.1	0.0	0.0	
AN	34.1	17.0	31.9	17.0	0.0	0.0	
AP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	
AK	0.0	0.0	0.0	27.7	51.1	21.3	
TN	6.4	42.6	42.6	6.4	2.1	0.0	
TP	0.0	0.0	2.1	31.9	53.2	12.8	
TK	0.0	0.0	4.3	14.9	10.6	70.2	
EMg	0.0	0.0	2.1	14.9	38.3	44.7	

表 5 高产与低产立地间土壤养分特征差异比较

Table 5 Comparison of soil nutrient status at high and low productivity sites

指标 Index	立地分组 Site group	均值 Mean	标准差 SD	<i>t</i>	显著性 Sig.	指标 Index	立地分组 Site group	均值 Mean	标准差 SD	<i>t</i>	显著性 Sig.
pH(H ₂ O)	LPS	4.14	0.18	-0.825	0.416	TN/(g·kg ⁻¹)	LPS	1.40	0.26	1.545	0.132
	HPS	4.19	0.19				HPS	1.66	0.53		
OM/(g·kg ⁻¹)	LPS	31.70	6.51	3.018	0.005	TP/(g·kg ⁻¹)	LPS	0.38	0.14	1.048	0.302
	HPS	45.72	14.67				HPS	0.33	0.11		
AN/(mg·kg ⁻¹)	LPS	116.33	27.49	2.102	0.043	TK/(g·kg ⁻¹)	LPS	1.68	0.86	-2.765	0.009
	HPS	157.77	62.28				HPS	3.12	2.26		
AP/(mg·kg ⁻¹)	LPS	1.46	0.36	0.058	0.954	EMg/(cmol·kg ⁻¹)	LPS	0.21	0.12	0.168	0.868
	HPS	1.45	0.42				HPS	0.20	0.12		
AK/(mg·kg ⁻¹)	LPS	41.18	22.20	-1.833	0.076	AAL/(g·kg ⁻¹)	LPS	42.06	8.92	1.396	0.172
	HPS	56.90	26.40				HPS	37.12	11.38		

4 讨论

4.1 土壤养分特征

以往的调查结果表明,西南桦天然分布区土壤

呈酸性至微酸性,pH 值为 4.2 ~ 6.5^[17];而本研究中,广西大青山西南桦人工林地土壤 pH 值为 3.9 ~ 4.7,绝大部分为强酸性土壤。可见,西南桦对酸性土壤的适应性强。当土壤逐渐酸化时,土壤铝会从

固相释放进入土壤溶液或以交换性铝吸附于土壤表面的阳离子交换位上^[18],pH 值影响土壤 Al 的可溶性,从而影响林木生长^[19],因而,西南桦人工林土壤活性 Al 含量与 pH 值呈显著负相关,西南桦对酸性土壤的强适应性亦某种程度上反映出其对活性铝具有较强的适应性。

广西大青山西南桦人工林地全 P、全 K、速效 K、交换性 Mg 缺乏,尤以有效 P 缺乏更甚。这可能与林地土壤类型有关。青山和白云实验场多为砂泥岩和中酸性火山岩发育的红壤,伏波则以花岗岩风化母质发育的红壤为主^[20],这些类型土壤由于 pH 值低,土壤中有效养分易流失,盐基流失亦加快,土壤胶体表面正电荷相应增加,增强了对 P 的吸附,导致土壤有效 P 缺乏^[21]。

土壤 pH 值通过影响林地土壤微生物活动,进而影响土壤 N 的矿化^[22]。本研究中,西南桦人工林土壤 pH 值低,但土壤全 N、有效 N 含量为中上水平,与戴万宏等^[23]对我国地带性土壤的研究结果一致;而 Curtin 等^[24]认为,绝大部分土壤有机质是比较固定的,仅小部分为可分解有机质,pH 值与有机质含量呈正相关。土壤微生物大多适宜在中性土壤中生长,pH 值下降,固 N 微生物活性亦下降,从而影响土壤 N 素系列代谢活动,含 N 有机物数量下降,使土壤有机质的量和质均下降^[21]。

4.2 土壤养分与立地指数

土壤各养分因子与目标树种立地指数间的关系复杂^[6, 25-26]。影响立地指数的土壤养分因子因树种而异,土壤 pH 值以及 K、N、CaCO₃ 影响波兰西南部欧洲赤松 (*Pinus sylvestris* L.) 立地指数大小^[25];在哥伦比亚,土壤全 N、矿质 N、有效 P 和 S 含量影响白云杉 (*Picea glauca* (Moench) Voss) 的立地指数^[27]。本研究通过高产和低产立地间的对比分析发现,有机质、有效 N、全 K 含量是影响广西大青山西南桦立地指数的关键土壤养分因子。尽管有效 P 含量低是我国亚热带地区森林生态系统生产力的一个重要限制因子^[28],然而,本研究中有效 P 对西南桦生长的差异性未能显现,究其原因,其一、属局域尺度研究,其土壤具有强酸和低 P 的共性特征,换言之,所有样地均呈现有效 P 缺乏(表 4);其二、西南桦对有效 P 含量低的土壤具有较强的适应;其三、一些重要因子,如土壤物理性质以及其他未测土壤化学因子的干扰,亦可能影响研究结果。究竟有效 P 含量是否为西南桦生长的限制因子,尚需在更大尺

度上进行深入研究予以证明。

在较大尺度上,除土壤因子外,气候、地形等因子影响树种的立地指数^[5, 12, 29-31]。如 Bergès 等^[7]对无梗花栎的研究得出,气候、地形和土壤因子可解释其立地指数 49%~60% 的变异;Farrelly 等^[12]研究北美云杉立地指数的影响因子时发现,气候区、风速、水分和养分供应等因子均有显著影响,但程度不同,如气候区和风速分别可解释立地指数变化的 12% 和 37%。因此,在未来西南桦人工林研究中,还需增加其它方面的因子,诸如气候、地形、土壤物理性质以及叶片养分等,从各尺度上进行分析研究,系统揭示立地因子与立地指数间的关系,为西南桦人工林立地选择与经营管理提供科学依据和技术支撑。

5 结论

广西大青山西南桦人工林地土壤普遍具有 pH 值和有效 P 含量低的特点,说明西南桦对此类土壤具有较强的适应性。有机质、全 K 和有效 N 含量是影响广西大青山西南桦人工林立地指数的关键土壤养分因子。因此,在该区域营建速生丰产林时应选择 pH 值较高的土壤,避免因土壤酸性较强影响土壤性质,造成土壤有机质、全 K、有效 N 等养分含量下降和不足,影响西南桦林正常生长。

参考文献:

- [1] Nohrstedt H. Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A review of Swedish experiences[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2001, 16(6): 555-573.
- [2] Scholten T, Goebes P, Kühn P, et al. On the combined effect of soil fertility and topography on tree growth in subtropical forest ecosystems—a study from SE China[J]. Journal of Plant Ecology, 2017, 10(1): 111-127.
- [3] Yasin K, Ali B M, Ouz H. Relationship of tree height with soil properties, soil and needle nutrients in cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) plantations[J]. Research Journal of Biotechnology, 2014, 9(7): 60-68.
- [4] Yu C B, Chen F, Luo Z J, et al. Evaluation of soil nutrient status in poplar forest soil by soil nutrient systematic approach[J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(4): 298-300.
- [5] Pietrzykowski M, Socha J, Doorn N S V. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) site index in relation to physico-chemical and biological properties in reclaimed mine soils[J]. New Forests, 2015, 46(2): 247-266.
- [6] Bravo F, Montero G. Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes[J]. Forestry, 2001, 74(4): 395-406.

- [7] Bergès L, Chevalier R, Dumas Y, *et al.* Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France[J]. *Annals of Forest Science*, 2005, 62(5): 391–402.
- [8] Kim H, Jeong S H, Kam D G, *et al.* Developing a site index model considering soil characteristics for *Pinus thunbergii* stands grown on the west coast of Korea[J]. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2013, 56(2): 173–180.
- [9] Afif-Khoury E, Cámara Obregón M A, Oliveira-Prendes J A, *et al.* Relationship among soil parameters, tree nutrition and site index of *Pinus radiata* D. Don in Asturias, NW Spain[J]. *Forest Systems*, 2010, 19(1): 77–88.
- [10] Blyth J F, Macleod D A. Sitka spruce (*Picea sitchensis*) in north-east Scotland. I. Relationships between site factors and growth[J]. *Forestry*, 1981, 54(1): 41–62.
- [11] Ford E W, Farr W A, Chien L P. Preliminary analysis of four soil variables and their relation to site index of Sitka spruce in southeast Alaska[C]//Slaughter C W, Gasbarro T. Proceedings of the Alaska Forest Soil Productivity Workshop. Anchorage, AK, April 28–30 1988. General Technical Report, PNW-219. USDA. Pacific North Western Research and Experimental Station, 1988:84–89.
- [12] Farrelly N, Dhubbáin Á N, Nieuwenhuis M. Sitka spruce site index in response to varying soil moisture and nutrients in three different climate regions in Ireland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(12): 2199–2206.
- [13] Wang C S, Zhao Z G, Hein S, *et al.* Effect of planting density on knot attributes and branch occlusion of *Betula alnoides* under natural pruning in southern China[J]. *Forests*, 2015, 6(4): 1343–1361.
- [14] 国家林业局. 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [15] 全国土壤普查办公室, 全国第二次土壤普查暂行技术规程[S]. 北京: 农业出版社, 1979.
- [16] 唐 诚. 西南桦人工林生长模拟及立地质量评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [17] 曾 杰, 郑海水, 翁启杰. 我国西南桦的地理分布与适生条件[J]. *林业科学研究*, 1999, 12(05): 479–484.
- [18] Li W, Johnson C E. Relationships among pH, aluminum solubility and aluminum complexation with organic matter in acid forest soils of the Northeastern United States[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 234–242.
- [19] 黄丽媛, 袁 军, 吴泽龙, 等. 油茶林地土壤铝的含量和化学形态分析[J]. *经济林研究*, 2016, 34(3): 79–83.
- [20] 杨继镐. 广西南部林地土壤与适生树种[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [21] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. *林业科学*, 2016, 52(12): 1–12.
- [22] Tian Y, Takashi K, Toda H, *et al.* pH and substrate regulation of nitrogen and carbon dynamics in forest soils in a karst region of the upper Yangtze River basin, China[J]. *Journal of Forest Research*, 2013, 18(3): 228–237.
- [23] 戴万宏, 黄 耀, 武 丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 851–860.
- [24] Curtin D, Peterson M E, Anderson C R. pH-dependence of organic matter solubility: Base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy[J]. *Geoderma*, 2016, 271: 161–172.
- [25] Lu Y H, Sit P, Hung T F, *et al.* Regression models for impact of soil properties on site index class of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in south-western Poland[J]. *Sylvan*, 2012, 156(8): 563–571.
- [26] Subedi S, Fox T R. Predicting loblolly pine site index from soil properties using partial least-squares regression [J]. *Forest Science*, 2016, 62(4): 449–456.
- [27] Wang G G. White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 25(1): 29–38.
- [28] 贝昭贤, 张秋芳, 郑 蔚, 等. 模拟增温对中亚热带杉木人工林土壤磷有效性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 38(3): 1–8.
- [29] Wang G G, Huang S M, Monserud R A, *et al.* Lodgepole pine site index in relation to synoptic measures of climate, soil moisture and soil nutrients[J]. *Forestry Chronicle*, 2004, 80(6): 678–686.
- [30] Brown J H. Growth and site index of white pine in relation to soils and topography in the glaciated areas of Ohio[J]. *Northern Journal of Applied Forestry*, 2007, 24(2): 98–103.
- [31] Sharma R P, Brunner A, Eid T. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, 27(7): 619–636.

(责任编辑:徐玉秀)