

不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质特征

萨如拉, 呼日查, 于晓雨, 王子瑞

(内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 土壤理化性质直接影响林木生长和森林生态系统的健康与稳定。在大兴安岭北部林区选取火烧干扰、采伐干扰以及人工条带改造干扰的白桦次生林作为研究对象, 选取 pH 值、土壤有机质等土壤理化性质指标, 利用层次分析法与熵权法相结合的主客观综合赋值法确定综合权重, 同时运用灰色关联度法, 计算各土壤综合指标值进而评估土壤肥力状况。研究表明: 1) 土壤速效磷、土壤有机质在所有土壤指标中所占权重较高, 分别为 0.233 和 0.165。说明土壤速效磷、有机质是土壤肥力重要影响因素。2) 土壤综合评价由大到小排序为 0.88 (人工条带改造干扰)、0.74 (采伐干扰)、0.65 (火烧干扰), 说明人工条带改造干扰白桦次生林土壤肥力最佳, 火烧干扰白桦次生林土壤肥力最差。可见, 合理适度的人工措施将有利于白桦次生林土壤肥力提升。通过分析探讨, 以期为进一步实现大兴安岭地区白桦次生林的可持续经营以及森林生态系统的稳定发展提供科学依据。

关键词: 大兴安岭; 白桦次生林; 不同干扰类型; 土壤肥力

中图分类号: S792.153; S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-6622(2022)02-0135-06

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2022.02.018

Soil Physicochemical Properties of *Betula platyphylla* Secondary Forest Under Different Disturbances in Daxing'anling

SA Rula, HU Richa, YU Xiaoyu, WANG Zirui

(Forestry College Inner Mongolia Agricultural University Hohhot 010019, China)

Abstract: Soil physical and chemical properties directly affect forest growth and forest ecosystem health and stability. This research took *Betula platyphylla* northern Daxing'anling with forest fire disturbance, the cutting interference and artificial stripe interference as the research object, selected a total of 11 indexes of soil physical and chemical properties, such as pH, soil organic matter, etc., used the subjective and objective comprehensive assignment method combining analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method to determine the synthesis weights, and at the same time, by applying the method of grey correlation, the soil fertility status was evaluated by calculating the comprehensive indexes of each soil. The results showed that soil available P and soil organic matter accounted for 0.233 and 0.165, respectively, which indicated that soil available P and soil organic matter were important factors affecting soil fertility. Soil values from big to small were in the order of 0.88 (artificial stripe interference), 0.74 (the cutting interference), 0.65 (interference) on fire, showing the birch forest soil fertility was the best in artificial stripe interference, the birch forest soil fertility was the worst in fire interference, showing that

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目“大兴安岭白桦次生林生态修复关键技术研究”与示范(2020GG0067)

作者简介: 萨如拉(1976-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 副教授, 博士, 研究方向: 森林可持续经营、退化森林生态系统修复。Email: 13947121438@163.com

reasonable moderate artificial measures would be conducive to the birch forest soil fertility improvement. The results will provide a scientific basis for the formulation of effective measures to improve the ecological function of *Betula platyphylla* secondary forest in Daxing'anling.

Key words: Daxing'anling; *Betula platyphylla* secondary forest; different disturbances; soil fertility

森林中土壤作为物质能量循环的重要场所,是林木生长发育的基础,能够影响林分植被种类、分布格局,森林植被能否正常生长与土壤肥力密切相关^[1-2]。土壤理化性质能够影响土壤肥力水平,还能够反映土壤蓄水能力和保水能力,从而影响植物生长^[3-4]。因此,研究土壤理化性质特征可为改良土壤性质、提高土壤肥力以及提供林木生长所需营养物质等森林经营措施提供科学依据^[5-7]。

目前,国内外学者对不同地区森林进行土壤理化性质研究与土壤肥力评价方面的研究,得出土壤理化性质会直接影响林木生长及健康状态,影响森林生物量,进而影响整个森林生态系统^[8-12]。一定程度上,土壤理化性质能够反映当前森林生态系统状态。如:韩敏等^[13]对大兴安岭不同演替阶段的天然落叶松林土壤肥力进行分析研究,发现天然落叶松成熟林土壤肥力最佳;发现随着森林演替过程的推进,土壤肥力会随之增加。管惠文等^[14]对大兴安岭兴安落叶松次生林在不同抚育间伐强度下的土壤肥力进行研究,发现间伐强度40%的兴安落叶松次生林土壤肥力最佳。说明适当间伐对土壤肥力增加有明显促进作用。李银祥等^[15]对蛮汗山几种典型林型土壤进行研究,发现华北落叶松人工林土壤质量比白桦天然次生林土壤质量更佳。说明天然次生林一旦开始退化,有待通过合理经营进行改良土壤肥力,否则将严重影响其森林功能的发挥。

本文以大兴安岭白桦次生林为研究对象,研究不同干扰对白桦次生林土壤理化性质的影响,并通过灰色关联度法综合评价土壤肥力,反映不同干扰

下白桦次生林土壤肥力的差异。这对大兴安岭白桦次生林的生态系统功能修复及科学制定森林质量提升措施具有重要的意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古呼伦贝尔根河林业局。属寒温带湿润季风性气候区,平均海拔800m以上;年平均气温为-5.3℃,极端气温-58℃,无霜期为80~90d,封冻期210d以上;平均年降水量500mm,雨季集中在6—9月。根河市境内永冻层分布广泛。土壤类型主要以棕色针叶林土为主,含砂粒及石砾较多,土壤呈酸性,pH值4.5~6.5。研究区内物种与林木资源丰富,优势树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii*),并伴生有白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等乔木^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2020年8月,在研究区内,根据采伐干扰、人工条带改造干扰、火烧干扰等3种干扰类型进行样地设置。共设置3块样地,面积均为30m×30m。样地概况如表1所示。

1.2.2 样品采集与测定方法

在每块样地内按照“S”型布点法均匀设置6个土壤剖面,取0~10cm,10~20cm处土壤混合样,去除枯枝落叶及石砾,用样品袋编号密封(3块样地,共18个样品),同时取环刀土用于测量土壤含水量、土壤容重、土壤孔隙度等物理性质(物理性质测

表1 不同干扰类型下的白桦次生林样地概况

Tab. 1 Overview of three fixed plots in *Betula platyphylla* secondary forest under different disturbance types

样地代号	干扰类型	方式与强度	恢复年限 /a	林分平均 年龄/a	平均海拔 /m	坡向	坡度 /(°)	郁闭度
M	人工条带改造	50m人工落叶松林带改造	26	22	905	东坡	8	0.60
H	火烧	火烧强度90%	18	8	940	东坡	4	0.30
S	采伐	二次渐伐	20	12	940	西南坡	2	0.64

定采用常规方法)。将新鲜的土壤样品带回实验室进行土壤化学指标的检验测定。土壤化学指标含量测定方法如表 2 所示。

表 2 土壤理化性质指标含量的测定方法
Tab. 2 Determination method of soil physical and chemical properties index content

分析对象	测定方法	主要仪器
pH	电位法	pH 计
有机质	重铬酸钾法	油浴锅
全氮	高氯酸-硫酸消化法	开氏定氮仪
全磷	高氯酸-硫酸消化法	分光光度计
全钾	氢氟酸-高氯酸消化法	原子吸收仪
速效氮	氯化钠溶液浸提	开氏定氮仪
速效磷	碳酸氢钠溶液浸提	分光光度计
速效钾	醋酸铵溶液浸提	原子吸收仪

1.2.3 土壤肥力综合评价方法

本文主要运用灰色关联度法进行森林土壤综合评价^[14]。首先建立灰色关联判断矩阵,然后运用层次分析法以及熵权法计算权重,最后通过计算得出不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质灰色关联度。

1.2.4 数据处理与分析

运用 Excel 2016 统计数据并进行初步分析;应用 SPSS 23.0 软件进行数据的统计分析、差异性分析、灰色关联预测。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质统计分析

根据所取土壤样本,测定不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质各指标值(表 3)。由表 3 可知:土壤有机质、全氮、全磷、速效钾含量大小均表现为 $M > S > H$; 全钾含量表现为 $M > H > S$; 速效氮含量表现为 $S > H > M$; 土壤容重、速效磷含量表现为 $H > S > M$; pH、土壤孔隙度表现为 $M > S > H$; 土壤含水率表现为 $S > M > H$,说明土壤持水性会受到火烧干扰的严重影响。有研究表明,土壤因受到火烧干扰,导致土壤容重因土壤有机矿物团聚体的增加而增大,从而破坏土壤持水性^[17]。本文研究结果与此结论相吻合。

不同干扰类型白桦次生林样地土壤指标极值、平均值与变异系数如表 4 所示。根据表 4 中所示各土壤指标变异系数数值可看出,研究区不同干扰下大兴安岭白桦次生林的各项指标中:全氮、速效磷变异系数均超过 50%,属于重度变异,说明干扰对此类土壤因子影响较大;有机质含量变异系数为 49%,属于中度变异;土壤孔隙度、容重、含水率、全磷、全钾、速效钾变异系数较小,说明较为稳定;pH 值变异系数较小为 7.4%,且 pH 值均值为 5.78,说明研究区内各样地均属于弱酸性土壤。

表 3 不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质指标值

Tab. 3 Indexes of soil physical and chemical properties of *Betula platyphylla* forest in Daxing'anling under different disturbances

样地	pH	有机质/ (g/kg)	全氮/ (g/kg)	全磷/ (g/kg)	全钾/ (g/kg)	速效氮/ (mg/kg)	速效磷/ (mg/kg)	速效钾/ (mg/kg)	孔隙度/ %	土壤容重/ (g/kg)	土壤含 水率/%
M	6.29	113.40	1.02	1.64	24.34	15.82	35.92	420.18	71.63	0.61	42.28
H	5.46	90.57	0.43	0.90	22.98	22.53	37.61	222.23	49.33	1.34	33.63
S	5.50	103.27	0.80	0.97	21.26	28.11	36.44	378.68	59.70	1.07	48.05

表 4 不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质变异幅度

Tab. 4 Variation range of soil physical and chemical properties of *Betula platyphylla* forest under different disturbances in Daxing'anling

数值	pH	有机质/ (g/kg)	全氮/ (g/kg)	全磷/ (g/kg)	全钾/ (g/kg)	速效氮/ (mg/kg)	速效磷/ (mg/kg)	速效钾/ (mg/kg)	孔隙度/ %	土壤容重/ (g/kg)	土壤含 水率/%
极小值	5.14	34.07	0.18	0.62	10.74	8.30	7.65	156.20	36.4	0.61	21.7
极大值	6.58	238.71	1.83	1.78	26.22	36.35	81.6	580.4	76.4	1.69	63.5
均值	5.78	102.41	0.75	1.17	22.86	21.60	36.66	340.37	60.2	1.05	41.3
标准差	0.43	50.18	0.44	0.38	3.65	7.04	18.58	124.26	0.11	0.30	0.11
变异系数/%	7.4	49.0	58.7	32.5	16.0	32.6	50.7	36.5	18.3	28.6	26.6

不同干扰下,大兴安岭白桦次生林土壤理化性质差异性分析结果如表 5 所示。3 种干扰类型下的白桦次生林土壤全钾、速效磷、有机质、土壤含水率差异性不显著,土壤全磷、速效氮、速效钾、pH、孔隙度、容重差异性较显著($P < 0.05$)。总体来看,人工条带改造干扰与火烧干扰

白桦次生林土壤理化性质之间有显著性差异($P < 0.05$)。

2.2 土壤理化性质灰色关联评度确定

2.2.1 确定决策矩阵

本研究选择 11 个土壤理化性质指标,并对其进行综合评价计算,具体指标如表 3 所示。

表 5 不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤理化性质差异性分析

Tab. 5 Soil physicochemical properties of *Betula platyphylla* forest in Daxing'anling under different disturbances

样地	全氮/(g/kg)	全磷/(g/kg)	全钾/(g/kg)	速效氮/(mg/kg)	速效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
M	1.02 ± 0.33a	1.64 ± 0.08a	24.34 ± 1.42a	15.82 ± 2.00b	35.92 ± 9.85a	420.18 ± 28.76a
H	0.43 ± 0.30b	0.90 ± 0.27b	22.98 ± 2.63a	22.53 ± 4.07ab	37.61 ± 23.86a	222.23 ± 97.15b
S	0.80 ± 0.65ab	0.97 ± 0.46b	21.26 ± 3.99a	28.11 ± 5.06a	36.44 ± 23.15a	378.68 ± 135.38ab
样地	pH	有机质/(g/kg)	孔隙度/%	土壤容重/(g/kg)	土壤含水率/%	
M	6.29 ± 0.15a	113.40 ± 13.31a	71.63 ± 3.49a	0.61 ± 0.09ab	42.28 ± 6.28a	
H	5.46 ± 0.24b	90.57 ± 68.37a	49.33 ± 10.69b	1.34 ± 0.28ab	33.63 ± 11.13a	
S	5.50 ± 0.39ab	103.27 ± 78.76a	59.70 ± 13.98ab	1.07 ± 0.37a	48.05 ± 13.67a	

注:表中数据是平均值 ± 标准差;同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

决策矩阵由 n 个样地 m 个评价指标的实测值集合得出。本研究 $n=3$ $m=11$ 得到决策矩阵(X)。

2.2.2 初始化决策矩阵

根据(1)式,对决策矩阵中的实际测量指标值进行无量纲化处理,得到不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤肥力决策矩阵(X')。(1)式中 x'_{ij} 和 x_{ij} 分别表示第 j 个样地的第 i 个土壤肥力指标因子的无量纲值和实测值, x_{i0} 表示第 i 个土壤指标的峰值。

$$x'_{ij} = x_{ij}/x_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

2.2.3 确定灰色关联判断矩阵

根据(2)式,计算不同干扰下大兴安岭白桦次生林土壤肥力各项指标的灰色关联系数(r_{ij})^[14];构成灰色关联评价矩阵(R)。

$$r_{ij} = \frac{\min_m \min_n |s_i - x'_{ij}| + \lambda \max_m \max_n |s_i - x'_{ij}|}{|s_i - x'_{ij}| + \lambda \max_m \max_n |s_i - x'_{ij}|} \quad (2)$$

式中: s_i 为初始化后决策矩阵(X')中第 i 行最大值 $\lambda = 0.5$ 。

$$X = \begin{bmatrix} 6.29 & 113.40 & 1.02 & 1.64 & 24.34 & 15.82 & 35.92 & 420.18 & 71.63 & 0.61 & 42.28 \\ 5.46 & 90.57 & 0.43 & 0.90 & 22.98 & 22.53 & 37.61 & 222.23 & 49.33 & 1.34 & 33.63 \\ 5.50 & 103.27 & 0.80 & 0.97 & 21.26 & 28.11 & 36.44 & 378.68 & 59.70 & 1.07 & 48.05 \end{bmatrix}$$

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.56 & 0.96 & 1 & 1 & 0.46 & 0.88 \\ 0.87 & 0.80 & 0.42 & 0.55 & 0.94 & 0.80 & 1 & 0.53 & 0.69 & 1 & 0.70 \\ 0.87 & 0.91 & 0.78 & 0.59 & 0.87 & 1 & 0.97 & 0.90 & 0.83 & 0.80 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.40 & 0.88 & 1 & 1 & 0.35 & 0.71 \\ 0.69 & 0.59 & 0.33 & 0.39 & 0.83 & 0.59 & 1 & 0.38 & 0.48 & 1 & 0.49 \\ 0.69 & 0.76 & 0.57 & 0.41 & 0.69 & 1 & 0.91 & 0.74 & 0.63 & 0.59 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.4 确定评价指标权重

不同的土壤理化性质指标对土壤整体肥力影响

程度不同。采用主观赋权法与客观赋权法相结合的方式,能够较为精确地体现土壤各项指标权重。将主

观权重与客观权重相结合得到综合权重。既能够保留数据客观精准性,又能体现数据之间的主观联系。

1) 利用层次分析法确定土壤指标主观权重。依据土壤理化性质类型分别设置目标层、系统层和指标层。通过方根法计算得到特征向量,再进行一致性检验,得出各指标主观权重。本文依据土壤理化性质的不同,系统层含有 5 项内容,分别为 pH、有机质、土壤物理性质、土壤全量、土壤有效量,其分别含有 1, 1, 3, 3, 3 项指标(表 6)。系统层权重向量由(3)式计算得出。

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_i n_i}{\sum_{i=1}^n Y_i n_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

式中: \bar{Y}_i 为系统层权重; n_i 为系统层中指标个数。

计算得出权重向量为 $(\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3, \bar{Y}_4, \bar{Y}_5) = (0.03, 0.16, 0.28, 0.30, 0.23)$ 。

表 6 主客观综合赋权重值
Tab. 6 Subjective and objective weights

系统层	指标层	主观权重 W_1	客观权重 W_2	综合权重 W_3
pH	pH	0.029	0.012	0.020
有机质	有机质	0.171	0.159	0.165
	孔隙度	0.069	0.020	0.044
土壤物理性质	土壤容重	0.079	0.032	0.056
	含水率	0.033	0.020	0.027
土壤全量	全氮	0.086	0.172	0.129
	全磷	0.106	0.043	0.074
	全钾	0.084	0.114	0.099
土壤有效量	速效氮	0.089	0.085	0.087
	速效磷	0.143	0.322	0.233
	速效钾	0.111	0.021	0.066

2) 利用熵权法计算得出土壤指标客观权重。根据各土壤指标分散程度,计算出各指标的熵权,再根据各土壤指标对熵权进行适当的修正,得到客观的权重值。熵值越小,表明土壤指标值变异越大,则该土壤指标可代表的信息越多,在土壤综合评价中起到的作用也越大,进而权重越大。熵权法能够充分从客观角度对指标赋权。

3) 结合以上计算得出的主观权重和客观权重,利用(4)式计算各项指标的综合权重。

$$W_3 = \mu W_1 + (1 - \mu) W_2 \quad (4)$$

式中: W_3 为土壤性质指标综合权重, W_1 为土壤性质指标主观权重, W_2 为土壤性质指标客观权重, μ 为偏好系数(取 0.5)。

计算结果如表 6 所示。

2.2.5 确定不同干扰下白桦次生林样地灰色关联评度

将灰色关联判断矩阵(R)和指标权重(W)相结合,根据(5)式计算出各样地指标的关联度 b_j 。具体结果如表 7 所示。

$$b_j = \sum_{i=1}^m (W_i \times r_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

表 7 不同干扰下林分土壤肥力灰色关联度

Tab. 7 Grey correlation degree of soil fertility under different disturbances

样地	关联度
M	0.88
H	0.65
S	0.74

关联度越高,说明土壤肥力越高^[14]。由表 7 可以看出,土壤肥力灰色关联由大到小为 $M(0.88) > S(0.74) > H(0.65)$ 。比较之下,人工条带改造干扰的白桦次生林土壤肥力最佳,采伐干扰白桦次生林次之,火烧干扰白桦次生林土壤综合性质最差。可见,火烧干扰对于土壤肥力的破坏性较大,而合理适度的人工抚育或改造森林可能会起到提高土壤质量,增强土壤肥力的作用,有益于森林生态系统的健康发展。

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 白桦次生林经不同干扰后,土壤质量将受到影响,进而改变土壤肥力状况,同时对地上林木的生长发育状况产生较大影响。本研究,各干扰类型下的白桦次生林土壤肥力指标中综合权重最高的为速效磷(0.233),其次是有机质(0.165)。表明速效磷和有机质是白桦次生林土壤肥力指标中的主要指标,对土壤肥力的影响较大。3 种干扰类型下的白桦次生林土壤理化性质指标之间均有一定的相关性,其中,全钾、速效磷、有机质、土壤含水率差

异性不显著,土壤全磷、速效氮、速效钾、pH、孔隙度、容重差异性较显著($P < 0.05$)。

2) 不同干扰下的白桦次生林土壤肥力灰色关联度由大到小为人工条带改造干扰(0.88) > 采伐干扰(0.74) > 火烧干扰(0.65),可见,人工条带改造干扰下的白桦次生林土壤肥力最好,火烧干扰下的白桦次生林土壤肥力最差。

3.2 讨论

大兴安岭白桦次生林经不同干扰后,土壤质量受到影响,直接影响林分生长状况。人工条带改造林土壤肥力优于采伐林和火烧恢复林,这与前人研究结果一致^[18]。土壤pH值会对土壤透水、透气性产生影响,同时影响土壤氮、磷、钾等营养元素的有效性;弱酸性土壤最适宜地上林木生长。本文所研究不同干扰类型的白桦次生林土壤pH值较为稳定,均呈弱酸性,均值为5.78,变异系数较小,可以为林木的生长提供稳定的土壤环境,有利于实现森林可持续经营。经研究可得森林土壤有机质与土壤全氮、全磷、速效钾、孔隙度的变化趋势基本一致。测定火烧干扰白桦次生林土壤有机质含量是研究土壤性状特征、判断土壤肥力状况及恢复情况的重要步骤之一^[19],火烧干扰后白桦次生林有机质含量小于其他两种干扰下的白桦次生林,说明火烧干扰对土壤有机质含量有较大影响。火烧一直是影响森林生态系统稳定发展的重要因素,火干扰后的森林地上植被与地下土壤理化性质存在密不可分的影响与响应,这与孟京辉^[20]等的研究一致。

对大兴安岭白桦次生林的保护及修复是长期且复杂的任务。由于林木的生长不仅仅与森林的干扰类型有关,还与不同干扰强度、气候、环境、地形地貌、动植物多样性等因素密不可分,多种因素都会相应影响土壤肥力质量,进而影响林木生长。因此,在以后的研究中要综合考虑各种影响因素,进一步探讨干扰强度、环境因素等对白桦次生林土壤理化性质特征的影响,进一步为大兴安岭白桦次生林土壤质量评价、土壤肥力的恢复、森林可持续经营提供全面科学的参考依据。

参考文献:

[1] 路翔. 中亚热带4种森林凋落物及土壤碳氮贮量与分布特征[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.

- [2] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.
- [3] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 等. 海河流域森林生态系统服务功能评估[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 2029-2039.
- [4] Schwartzman S, Alencar A, Zarin H, et al. Social movements and large-scale tropical forest protection on the Amazon frontier: conservation from chaos[J]. Journal of Environment & Development, 2010, 19(3): 274-299.
- [5] 陆元昌, 栾慎强, 张守攻, 等. 从法正林转向近自然林: 德国多功能森林经营在国家、区域和经营单位层面的实践[J]. 世界林业研究, 2010, 23(1): 1-11.
- [6] Alston L J, Andersson K P. Reducing Greenhouse Gas Emissions by Forest Protection: The Transaction Costs of Redd[J]. Nber Working Papers, 2011, 2(2): 281-289.
- [7] Takahashi R, Todo Y. Impact of community-based forest management on forest protection: evidence from an aid-funded project in Ethiopia[J]. Environmental Management, 2012, 50(3): 396-404.
- [8] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [9] 朱玉杰, 董希斌. 大兴安岭用材林不同强度采伐后土壤模糊聚类分析[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(10): 65-71.
- [10] 李广会, 郭素娟, 邹锋, 等. 板栗叶片营养与土壤养分的动态变化及回归分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(9): 41-46.
- [11] 纪浩. 大兴安岭低质林改造后土壤肥力质量评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [12] Danielson M, Visser S. Effects of forest soil acidification on ectomycorrhizal and vesicular-arbuscular mycorrhizal development[J]. New Phytologist, 2010, 112(1): 41-47.
- [13] 韩敏, 董希斌, 管惠文, 等. 大兴安岭天然落叶松林不同演替阶段土壤性质对生态功能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(12): 50-54.
- [14] 管惠文, 董希斌, 曲杭峰, 等. 抚育间伐强度对大兴安岭落叶松次生林土壤肥力的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(2): 27-33.
- [15] 李银祥, 季蒙, 曹恭祥, 等. 蛮汉山典型森林植被土壤理化性质特征研究[J]. 内蒙古林业科技, 2021, 47(2): 24-29.
- [16] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林土壤有机碳特征及与其他土壤理化性质关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(9): 1200-1208.
- [17] 陈小伟, 刘发林, 韩育明. 火干扰后枫香次生林不同土层土壤理化性质研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 45-53.
- [18] 于楠楠, 马世明, 刘瑞龙, 等. 内蒙古苏木山华北落叶松人工林土壤养分变化规律[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 190-194.
- [19] 张扬, 铁牛, 刘洋, 等. 大兴安岭火烧迹地土壤有机质含量的Meta分析[J]. 中国林副特产, 2021(5): 1-4.
- [20] 孟京辉, 陆元昌, 刘刚, 等. 不同演替阶段的热带天然林土壤化学性质对比[J]. 林业科学研究, 2010, 23(5): 791-795.