DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.031
朱正青，满秀玲. 林下植被对寒温带兴安落叶松林土壤磷形态及有效性的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):339-350.
ZHU Zhengqing, MAN Xiuling. Effects of understory vegetation on soil phosphorus morphological and availability in *Larix gmelinii* forest in the cold temperate zone[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):339-350.

林下植被对寒温带兴安落叶松林土壤磷形态及有效性的影响

朱正青，满秀玲
(东北林业大学林学院,哈尔滨 150040)

摘　要:[**目的**]由于大兴安岭寒温带兴安落叶松林下植被差异较大,其土壤理化性质也有较大差异,研究不同林下植被兴安落叶松林土壤磷形态变化特征及有效性,为科学评价寒温带森林土壤磷素供给水平及磷循环研究提供科学数据。[**方法**]选取大兴安岭寒温带 4 种林下植被兴安落叶松林(兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林、苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林)为研究对象,于 2022 年 6,8,10 月采集 0—5,5—10,10—20 cm 土层土壤样品,采用 Hedley 磷分级法测定土壤不同形态磷含量。[**结果**](1)观测期间 4 种林下植被兴安落叶松林土壤活性磷(H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi、$NaHCO_3$—Po)和中等活性磷(NaOH—Pi、NaOH—Po)在 6—10 月总体呈降低趋势,中等活性磷含量占全磷的 30.08%～52.80%,且中等活性磷均表现出无机磷含量高于有机磷含量。兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林 0—20 cm 土层活性磷、中等活性磷含量均高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林。苔草—落叶松林土壤稳定性磷(HCl—Pi、HCl—Po、residual—P)均显著高于其他 3 种落叶松林,且稳定性磷占全磷的 58.86%～65.81%。(2)4 种林下植被落叶松林土壤全磷(TP)、有效磷(AP)和磷活化系数(PAC)在 6—10 月变化范围分别为 391.81～1 081.02,7.34～83.90 mg/kg 和 1.62%～7.76%,兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤 AP 含量和 PAC 高于另外 2 种落叶松林,表现出较高的磷有效性;而苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林在 8,10 月 5—10,10—20 cm 土层则出现供磷不足现象。(3)土壤含水率是兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤磷的主要影响因素,可溶性碳是苔草—落叶松林的主要影响因素,而铵态氮对苔藓—落叶松林影响较大。[**结论**]林下植被对兴安落叶松林土壤磷形态及磷有效性有显著影响,兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤活性磷组分、中等活性磷组分及有效磷含量较高,磷活化系数均在 2.00%以上;而苔草—落叶松林土壤稳定性磷组分含量较高,土壤磷有效性相对较低。研究结果对寒温带森林生态系统林下植被生态功能及土壤养分循环研究具有重要意义。

关键词: 大兴安岭;落叶松林;土壤磷形态;活性磷;有效磷
中图分类号:S714　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0339-12

Effects of Understory Vegetation on Soil Phosphorus Morphological and Availability in *Larix gmelinii* Forest in the Cold Temperate Zone

ZHU Zhengqing, MAN Xiuling
(*School of Forestry*, *Northeast Forestry University*, *Harbin* 150040, *China*)

Abstract: [**Objective**] Due to the large differences in understorey vegetation and soil physicochemical properties of *Larix gmelinii* forest in the cold temperate zone of the Rreater Khingan Mountains, the characteristics and availability of soil phosphorus morphological changes of *Larix gmelinii* forest under different forests were studied, so as to provide scientific data for scientific evaluation of soil phosphorus supply level and phosphorus cycle in the cold temperate zone forest. [**Methods**] Four kinds of understory vegetation in the cold temperate zone of the Greater Khingan Mountains, namely, *Larix gmelinii* forest (*Rhododendron simsii-Larix gmelinii* forest, *Rhododendron tomentosum* — *Larix gmelinii* forest, *Carex*

收稿日期:2023-09-23　**修回日期:**2023-10-23　**录用日期:**2023-11-27　**网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-03-04
资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2200405)
第一作者:朱正青(1997—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: m18394156083@163.com
通信作者:满秀玲(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail: mannefu@163.com

schmidtii—*Larix gmelinii* forest and *Moss*—*Larix gmelinii* forest) were selected as the research objects. Soil samples from the 0—5 cm, 5—10 cm and 10—20 cm soil layer were collected from June, August and October 2022. Hedley phosphorus classification method was used to determine the phosphorus content of different forms in soil. [**Results**] (1) During the observation period, soil active phosphorus (H_2O—Pi, $NaHCO_3$—Pi, $NaHCO_3$—Po) and medium active phosphorus (NaOH—Pi, NaOH—Po) of the four understorey vegetation *Larix gmelinii* forest showed a decrease trend from June to October, and the content of medium active phosphorus accounted for 30.08% to 52.80% of total phosphorus. The content of inorganic phosphorus was higher than that of organic phosphorus. The content of active phosphorus and medium active phosphorus in 0—20 cm soil layer of *Rhododendron simsii*—*Larix gmelinii* forest and *Rhododendron tomentosum*—*Larix gmelinii* forest were higher than those of the *Carex schmidtii*—*Larix gmelinii* forest and *Moss*—*Larix gmelinii* forest. The soil stability phosphorus (HCl—Pi, HCl—Po, and residual—P) in the *Carex schmidtii*—*Larix gmelinii* forest was significantly higher than that in the other three larix forests, and the stable state phosphorus accounted for 58.86%～65.81% of the total phosphorus. (2) Soil total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and phosphorus activation coefficient (PAC) in *Larix gmelinii* forest were 391.81 to 1 081.02, 7.34 to 83.90 mg/kg, and 1.62% to 7.76% from June to October, respectively. The content of AP and PAC in the soil of the *Rhododendron simsii*—*Larix gmelinii* forest and *Rhododendron tomentosum*—*Larix gmelinii* forest were higher than those of the other two larix forests, showing higher phosphorus availability. On the other hand, there was insufficient phosphorus supply in the soil layer of the *Carex schmidtii*—*Larix gmelinii* forest and *Moss*—*Larix gmelinii forest* from 5—10 cm and 10—20 cm in August and October. (3) Soil moisture contentwas the main influencing factor of soil phosphorus in the *Rhododendron simsii*—*Larix gmelinii* forest and the *Rhododendron tomentosum*—*Larix gmelinii* forest, soluble carbon was the main influencing factor of the *Carex schmidtii*—*Larix gmelinii* forest, and ammonium nitrogen had a greater influence on the *Moss*—*Larix gmelinii* forest. [**Conclusion**] Understory vegetation had a significant effect on soil phosphorus morphological form and phosphorus availability in *Larix gmelinii forest*. The content of active phosphorus, medium active phosphorus and available phosphorus in the soil of *Rhododendron simsii*—*Larix gmelinii* forest and *Rhododendron tomentosum*—*Larix gmelinii* forest was higher, and the activation coefficients of P were all above 2.00%; However, the content of stable phosphorus in soil of the *Carex schmidtii*—*Larix gmelinii* forest was higher, and the availability of soil phosphorus was lower. This results are of great significance for the study of ecological function of understory vegetation and soil nutrient cycle in the cold temperate forest ecosystem.

Keywords: Greater Khingan Mountains; *Larix gmelinii forest*; soil phosphorus morphological; active phosphorus; available phosphorus

Received: 2023-09-23 **Revised**: 2023-10-23 **Accepted**: 2023-11-27 **Online**(www.cnki.net): 2024-03-04

磷是植物必需的大量营养元素之一,土壤磷的丰缺直接影响林木的生长和发育[1]。由于土壤磷的难溶性,植物能够直接吸收和利用的磷含量较少,故土壤磷素有效性的研究一直是相关领域的热点问题[2-3]。土壤有效磷包括土壤溶液中的磷酸根和能向土壤溶液输入磷酸根的磷形态,且有效磷含量及磷素累积形态是评价土壤磷素供应能力重要指标[4]。林下植被作为森林生态系统的重要组成部分,在调节林下环境、提高土壤养分含量和促进养分有效吸收方面发挥着重要作用[5]。有研究[6-9]表明,林下植物的凋落物和根系分泌物能够为土壤微生物提供多样化的分解物质,从而对土壤微生物的数量、群落结构和分解活性产生影响,进而改变土壤有机磷的转化过程和土壤磷素的形态组成[10],影响磷的有效性和供应水平[11]。翟政等[12]研究发现,清除林下植被可显著降低土壤总活性磷含量,林下植被的存在有助于促进磷素的循环和转化,将稳定态的磷逐步释放出来以提高磷素有效性;SAND—JENSEN 等[13]研究发现,长期清除林下植被会显著影响凋落物分解速率,同时造成磷的损失;杨起帆等[14]研究发现,林下植被的差异可

导致土壤磷组分及有效性不同。因此,林下植被在驱动森林生态系统结构和功能中发挥着重要作用。

我国寒温带位于欧亚大陆多年冻土分布区南缘[15],森林资源丰富,对气候变化的响应较为敏感,同时对我国东北平原乃至华北平原起着重要的生态屏障作用。该地区纬度高、气温低,也是我国多年冻土主要分布区,地带性植被是以兴安落叶松为主的明亮针叶林。由于本区兴安落叶松林面积大、分布广,林下植被差异较大。有研究[16]表明,大兴安岭兴安落叶松林土壤磷含量较低,也有研究[17]表明,不同林下植被的兴安落叶松林土壤理化性质存在一定差异,但林下植被对土壤磷组分和有效性是否产生影响?主要影响因子又是什么?因此,本研究以寒温带不同林下植被兴安落叶松林为研究对象,探讨林下植被对兴安落叶松林土壤磷形态及有效性的影响,以期为该地区森林土壤磷有效性及土壤磷循环研究提供理论基础。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区域位于黑龙江省大兴安岭地区漠河市北极村(123°15′30″E,53°33′30″N),海拔 287 m。该区属于寒温带大陆性季风气候,气候湿润,夏冬多雨,年平均气温−4.9 ℃,无霜期平均 86 天,年平均降水量 460 mm。研究区处于多年冻土分布区,且多年冻土层相对较厚,深度可达 50～100 m,活动层厚度在 0.5～1.0 m。该地区的地带性土壤为棕色针叶林土,同时也存在草甸黑土和沼泽土。地带性植被是以兴安落叶松(*Larch gmelini*)为优势建群种的明亮针叶林。同时,该区还有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林和山杨(*Populus davidiana*)林等[18]。林下植物主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、越桔(*Vaccinium vitis*)、北悬钩子(*Rubus arcticus*)、凤毛菊(*Saussurea japonica*)和红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*)等。

1.2　样地设置与样品采集

1.2.1　样地设置　于 2021 年 10 月在踏查基础上选择 4 种林下植被兴安落叶松天然林,分别为兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林、苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林,在每种林型设置 3 块 20 m×30 m 样地,用测高器、胸径尺等分别测定各样地林木的树高和胸径,用样点测定法估测林分的郁闭度。分别在每个样地内设置 3 个 5 m×5 m 灌木调查样方和 5 个 1 m×1 m 草本调查样方,分别调查灌木和草本植物种类,用收获法测定林下植被生物量,同时设置 0.5 m×0.5 m 凋落物样方,测定凋落物现存量(表 1)。

表 1　样地基本情况

Table 1　Basic information of the sample site

林型	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	密度/(株·hm^{-2})	TC/(g·kg^{-1})	TN/(g·kg^{-1})	容重/(kg·m^{-3})	林下主要植物	林下植被生物量/(t·hm^{-2})	凋落物储量/(t·hm^{-2})
DJL	312	6	75～90	13.67	15.68	0.7	1 217	38.21±0.88	1.33±0.30	1.13±0.15	1,5,6,8,9	12.16±1.37	5.36±1.03
DXL	311	4	75～90	13.30	14.01	0.8	1 267	31.48±1.09	1.18±0.21	1.31±0.21	2,1,5,6,7,9	9.15±1.45	5.27±0.80
TCL	300	2	75～90	12.81	14.09	0.7	1 567	58.57±0.49	1.40±0.39	1.57±0.08	3,2,5,10	5.34±0.62	6.61±1.26
TXL	314	3	75～90	14.01	13.89	0.7	1 300	17.17±0.43	0.69±0.05	1.08±0.11	4,2,6,8	4.78±0.37	4.46±0.78

注:表中数据为平均值±标准差;DJL 为兴安杜鹃—落叶松林;DXL 为杜香—落叶松林;TCL 为苔草—落叶松林;TXL 为苔藓—落叶松林;1 为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*);2 为杜香(*Ledum palustre* var. *decunbens*);3 为苔草(*Carex tristachya*);4 为泥炭藓(*Sphagnum palustre*);5 为笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*);6 为越桔(*Vaccinium vitis idaea*);7 为红花鹿蹄草(*Pyrola incarnata*);8 为东方草莓(*Fragaria orientalis*);9 为地榆(*Sanguisorba officinalis*);10 为小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)。

1.2.2　样品采集　根据实地调查和当地物候变化情况,选取 6 月植物生长季初期,8 月生长旺盛时期,10 月生长结束期进行样品采集,每月月初取样 1 次,在每个样地内按照“S”形设置 3 个取样点,清理土壤表层凋落物和草毡层,使用内径为 10 cm 的土钻分层采集 0—5,5—10,10—20 cm 土层的土壤样品。采集后的土壤样品用塑封袋封好低温保存带回实验室。挑出土壤中的动植物残体及石砾等杂物后过 2 mm 筛并分为 2 份,一份于 4 ℃下冷藏保存,供测定土壤可溶性碳氮、微生物量碳氮、铵态氮、硝态氮、微生物量磷等指标的测定;另一份置于阴凉处自然风干后用于土壤总有机碳、总氮、全磷、有效磷、磷分级及土壤 pH 的测定。

1.3　测定方法

土壤温度在取样时使用便携式温度计(6310,Spectrum,USA)直接测定;土壤含水量采用铝盒烘干法测定(105 ℃,24 h),土壤 pH 采用 pH 计法测定(PHS−3E)。总有机碳(TOC)采用 multi N/C 3100

TOC总有机碳/总氮分析仪(德国耶拿)固体模块测定;可溶性碳、氮(DOC、DON)微生物碳、氮(MBC、MBN)采用TOC液体模块测定;微生物量磷、有效磷采用钼锑抗比色法测定;全氮及铵态氮、硝态氮采用德国AA3连续流动分析仪(AutoAnalyzer－AA3,Seal Analytical,Norderstedt,Germany)测定。

磷分级测定:本研究根据SUI等[19]修正的Hedley磷分级法测定土壤中不同磷形态含量。称取1.0 g过2 mm土壤筛的风干土样置于50 mL离心管中,逐级加入30 mL的去离子水、0.5 mol/L $NaHCO_3$溶液、0.1 mol/L NaOH溶液、1 mol/L HCl溶液浸提,采用钼锑抗比色法测定浸提液中无机磷含量,有机磷含量采用浸提液经硫酸－高氯酸消解后测定全磷含量减去无机磷含量,最后土壤样品用硫酸－高氯酸高温消解法测定未被浸提出的残留磷(residual—P)含量。其中土壤活性磷为H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi和$NaHCO_3$—Po,土壤中等活性磷为NaOH—Pi和NaOH—Po,土壤稳定性磷为HCl—Pi、HCl—Po和residual—P,土壤总磷(TP)为所有磷组分之和。

1.4 分析方法

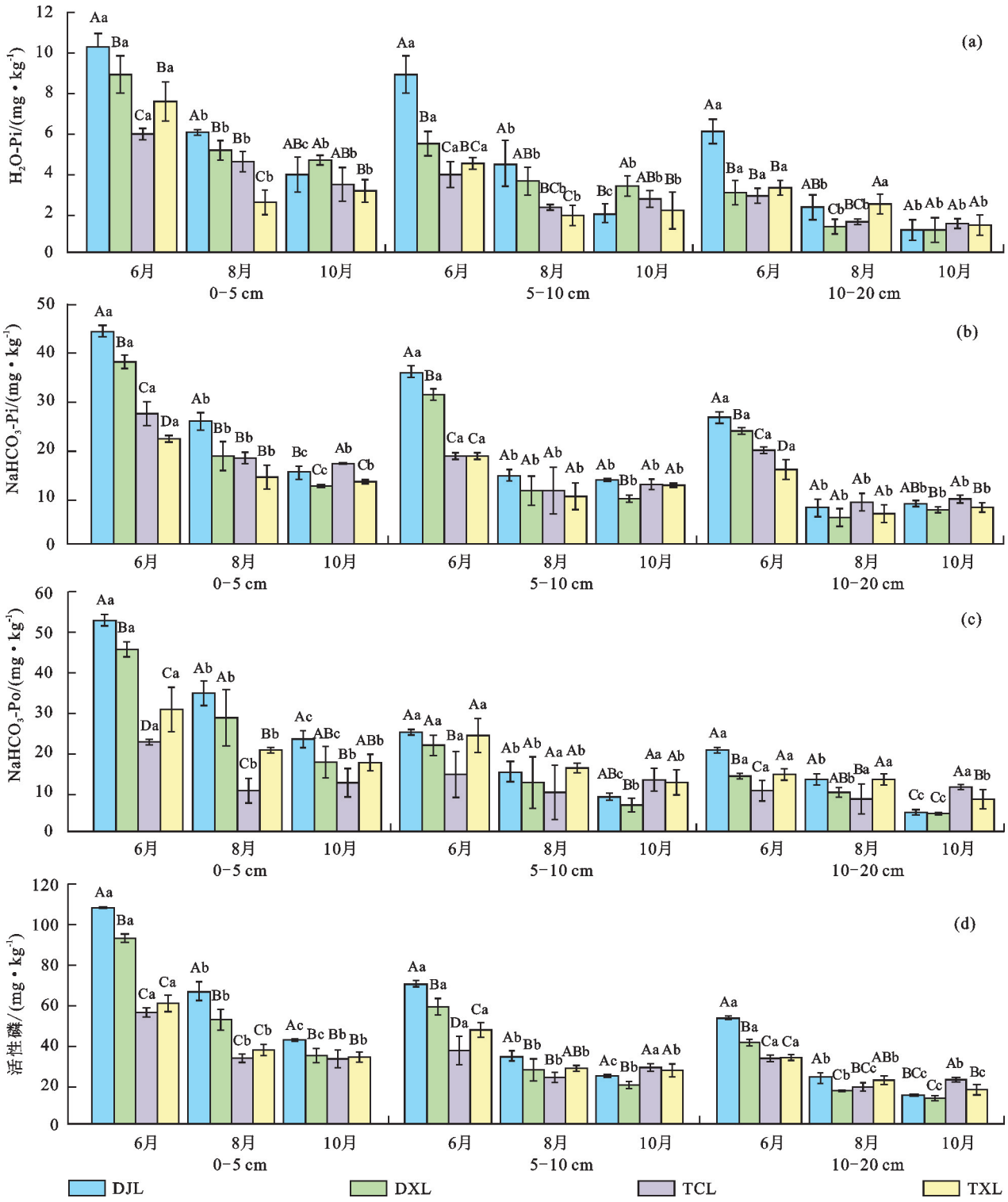
运用Microsoft Office Excel 2016软件对数据进行初步处理,采用SPSS 19.0软件对土壤理化性质、土壤磷组分数据进行单因素方差分析(One－way ANOVA,$\alpha=0.05$)和最小显著差异法(LSD)分析;对磷组分与土壤基本理化性质进行Pearson相关性分析;运用Canoco5.软件进行冗余分析(RDA),利用Origin 8.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同林下植被兴安落叶松林土壤磷组分变化特征

2.1.1 不同林下植被兴安落叶松林土壤活性磷含量变化特征 土壤中的活性磷主要包含H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi和$NaHCO_3$—Po,均可被植物直接利用,其含量可以反映土壤供磷强度[20]。由图1可知,6—10月不同林下植被兴安落叶松林0—20 cm土层土壤H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi和$NaHCO_3$—Po含量均表现为逐渐下降趋势。土壤H_2O—Pi含量变化范围为1.21～11.19 mg/kg(图1a),0—5,5—10 cm土层兴安杜鹃—落叶松林在6—10月呈逐渐降低趋势($p<0.05$),另外3种落叶松林在6—8月呈降低趋势,而10月略有升高,但增幅不显著($p>0.05$),10—20 cm土层变化趋势差异较大。0—20 cm土层平均值表现为兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔藓—落叶松林>苔草—落叶松林($p<0.05$)。土壤$NaHCO_3$—Pi含量变化范围为6.05～48.84 mg/kg(图1b),在6—8月兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林3层土壤降幅均高于苔草—落叶松林和苔藓落叶松林。6—10月兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林和苔藓—落叶松林各土层土壤$NaHCO_3$—Po含量均逐渐降低(图1c),降幅为43.52%～76.47%,均达显著程度($p<0.05$);而苔草—落叶松林3个土层均表现为10月有所增加,但差异性不显著($p>0.05$)。不同林下植被落叶松林0—20 cm土层土壤活性磷含量平均值表现为兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔草—落叶松林>苔藓—落叶松林。由此可见,4种林下植被兴安落叶松林不同土层土壤3种形态活性磷含量及活性磷总量在6—8月均呈显著降低趋势,而8—10月变化幅度相对较小,兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林活性磷组分含量和变化幅度均高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林。

2.1.2 不同林下植被兴安落叶松林土壤中等活性磷含量变化特征 中等活性磷由NaOH—Pi、NaOH—Po组成,主要包括与Fe、Al等金属氧化物和腐殖酸结合的磷酸盐,其经过长期矿化作用才能供植物吸收利用[21]。6—10月4种林下植被兴安落叶松林土壤NaOH—Pi、NaOH—Po含量总体呈降低趋势,土壤NaOH—Pi含量为103.40～368.29 mg/kg(图2a),6—10月兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林和苔藓—落叶松林3层土壤NaOH—Pi含量均呈逐渐降低趋势($p<0.05$);而苔草—落叶松林10—20 cm土层在10月有所增加($p<0.05$)。0—20 cm土层平均值表现为兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔藓—落叶松林>苔草—落叶松林($p<0.05$)。土壤NaOH—Po含量为50.46～202.52 mg/kg(图2b),3个土层兴安杜鹃—落叶松林降幅为27.33%～49.07%;杜香—落叶松林降幅为32.10%～39.69%;苔草—落叶松林为10.03%～25.70%;苔藓—落叶松林0—5 cm土层降幅最大,为24.53%,10—20 cm土层则表现出逐渐增加的趋势,但差异不显著($p>0.05$)。因此,6—10月4种林下植被兴安落叶松林土壤NaOH—Pi含量表现为兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林,兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤NaOH—Po变化幅度大于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林,4种落叶松林土壤中等活性磷表现为兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔藓—落叶松林>苔草—落叶松林,且无机磷含量高于有机磷含量。



注:不同大写字母表示不同林型之间差异达显著水平($p<0.05$);不同小写字母表示不同月份之间差异达显著水平($p<0.05$)。下同。

图 1　不同林下植被兴安落叶松林土壤活性磷含量变化特征

Fig. 1　Characteristics of changes in soil reactive phosphorus content in *Larix gmelinii* forest with different understorey vegetation

2.1.3　不同林下植被兴安落叶松林土壤稳定性磷含量变化特征　稳定性磷由 HCl—Pi、HCl—Po 和 residual—P 组成,观测期间变化范围为 207.32～566.96 mg/kg,且随土层加深含量降低(图 3d)。土壤 HCl—Pi 含量变化范围为 69.33～258.43 mg/kg(图 3a),HCl—Po 含量变化范围为 11.47～65.74 mg/kg(图 3b),苔草—落叶松林在观测期间土壤 HCl—P 显著高于其他 3 种落叶松林。4 种兴安落叶松林 0—20 cm 土层土壤 residual—P 含量均值表现为苔草—落叶松林>兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔藓—落叶松林(图 3c)。苔草—落叶松林稳定性磷占全磷百分比为 58.86%～65.81%(图 3c),其余 3 种落叶松林占

比为 36.34%～57.19%。由此可见，苔草—落叶松林土壤 HCl—Pi、HCl—Po、residual—P 及稳定性磷总量均高于其他 3 种落叶松林，且稳定性磷总量占全磷百分比也较高，达 58.86%～65.81%。

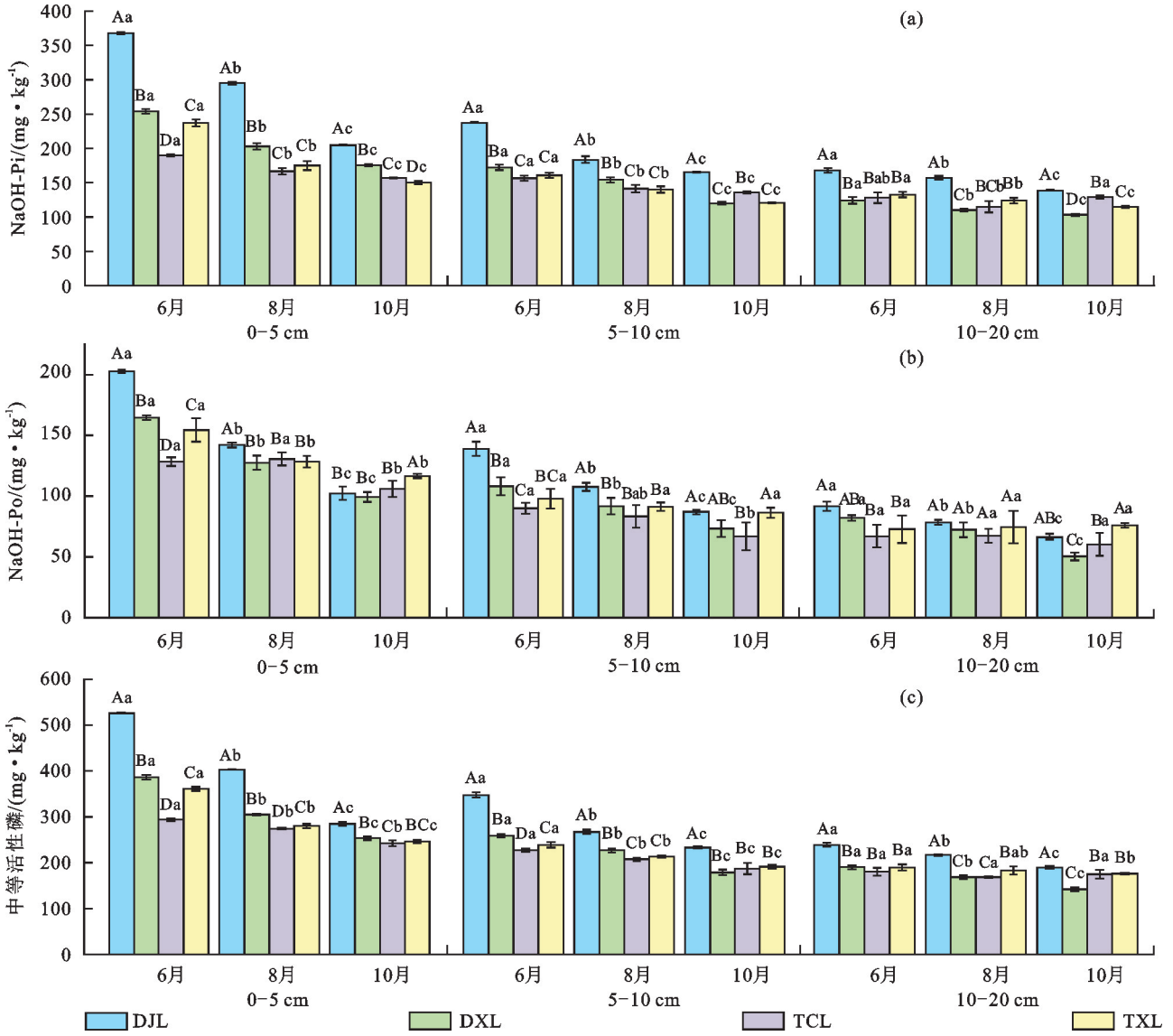


图 2 不同林下植被兴安落叶松林土壤中等活性磷含量变化特征

Fig. 2 Characteristics of changes in soil medium active phosphorus content in *Larix gmelinii* forest with different understorey vegetation

2.2 不同林下植被兴安落叶松林全磷和有效磷变化特征

根据图 4a 可知，6—10 月不同林下植被兴安落叶松林土壤 TP 含量为 416.79～1 081.02 mg/kg，其中兴安杜鹃—落叶松林 0—5 cm 土层下降幅度最大为 30.25%，达到显著水平($p<0.05$)。不同林下植被兴安落叶松林土壤 AP 含量变化范围为 7.34～83.90 mg/kg(图 4b)，0—20 cm 土层平均值兴安杜娟—落叶松林和杜香—落叶松林显著高于其他 2 种林型，且在 6—10 月各土层 AP 含量均呈逐渐降低趋势，而苔草—落叶松林和苔藓落叶松林的 5—20 cm 土层则在 10 月有不同程度的升高。由图 4c 可知，观测期间兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林 0—20 cm 土层土壤 PAC 变化范围为 2.17%～7.76%，均高于 2.00%，而在 8 月和 10 月苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林 5—20 cm 土壤低于 2.00%。0—20 cm 土层 PAC 平均值表现为兴安杜鹃—落叶松林>杜香—落叶松林>苔藓—落叶松林>苔草—落叶松林($p<0.05$)。由此可见，4 种林下植被落叶松林土壤全磷、有效磷、磷活化系数均存在显著差异，其中兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林 3 层土壤全磷含量变化幅度、有效磷含量及磷活化系数均高于其他 2 种落叶松林，且表现出较高的磷有效性；而苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林在 8 月和 10 月 5—10，10—20 cm 土层则表现出供磷不足现象。

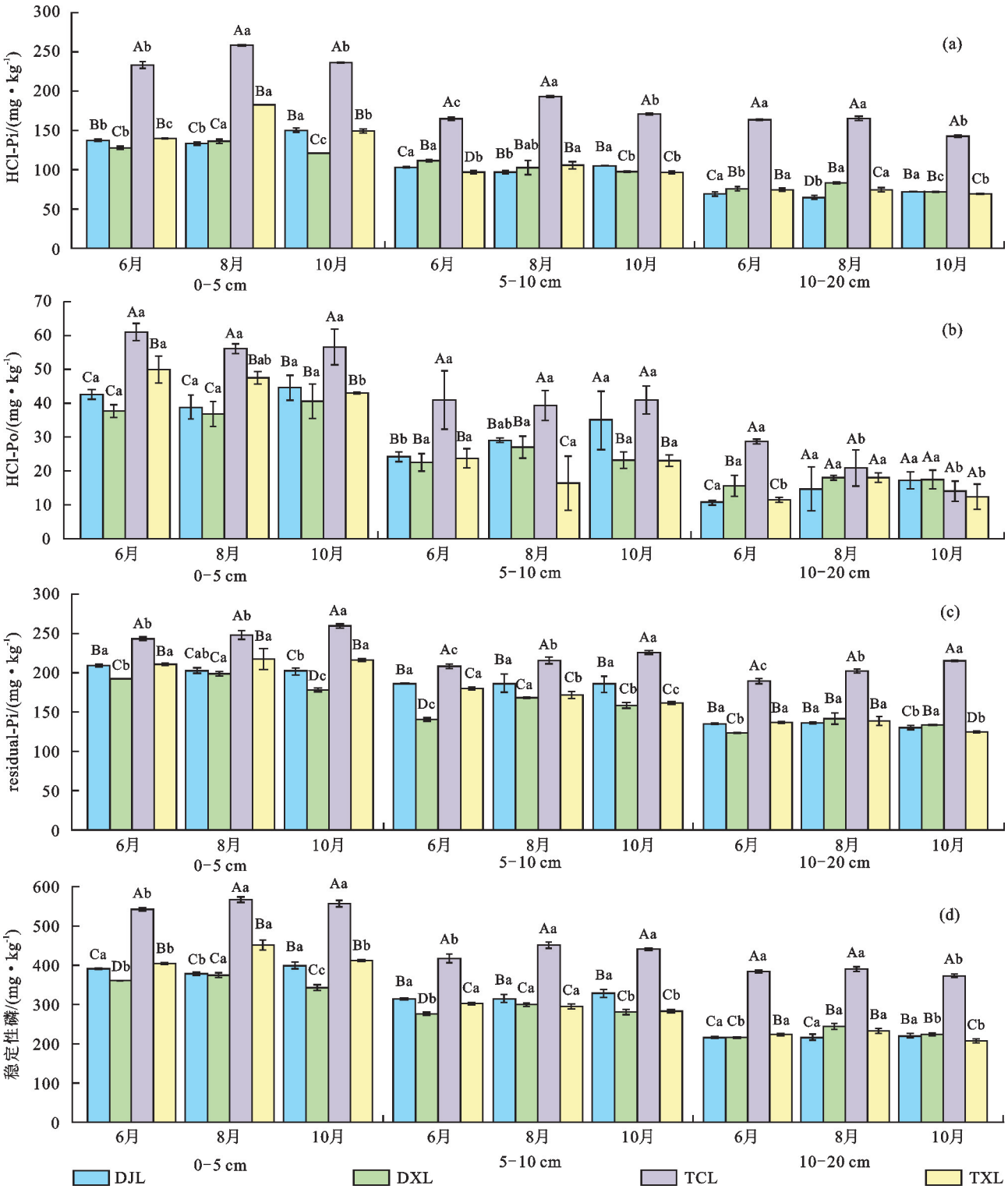


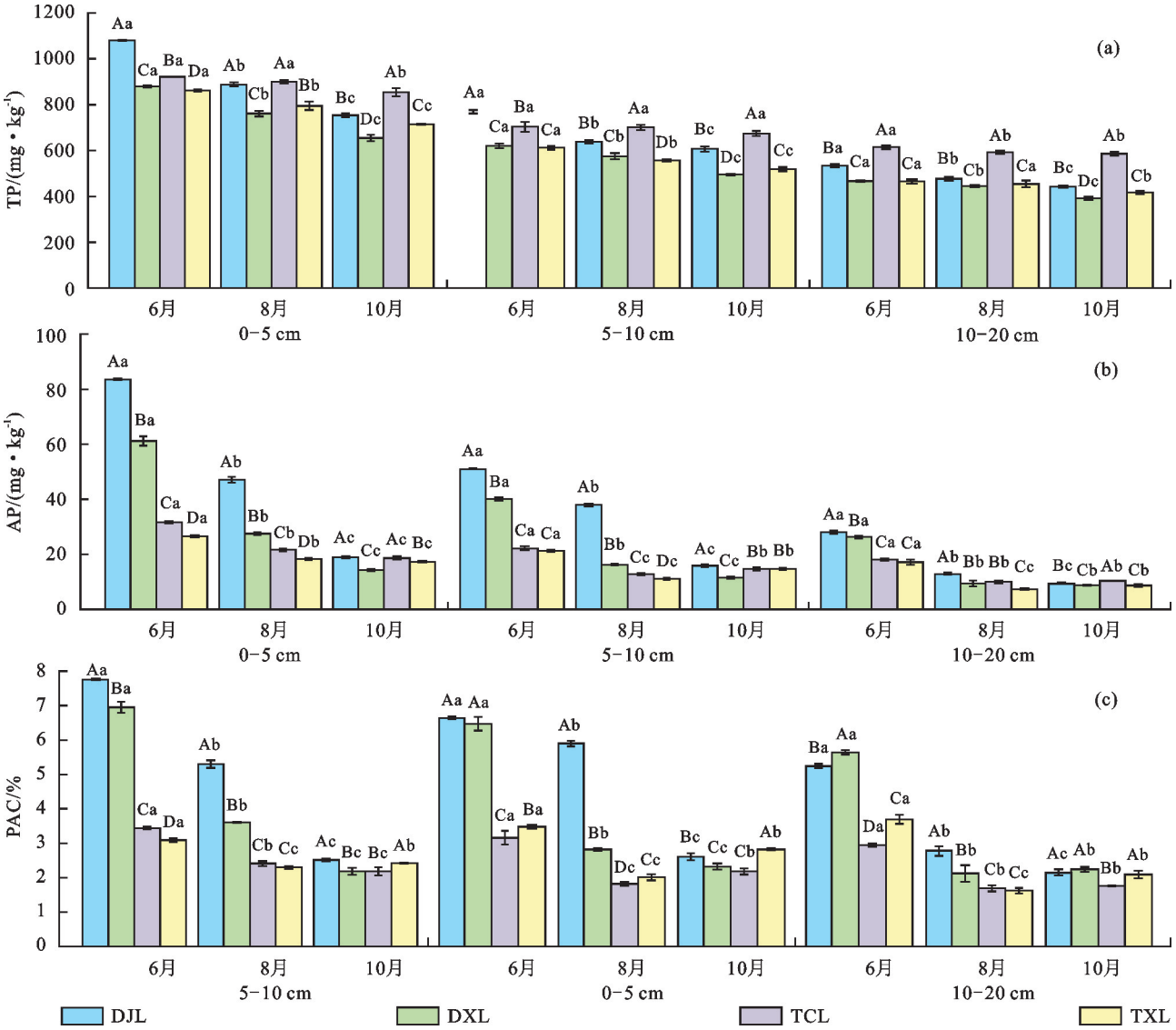
图 3　不同林下植被兴安落叶松林土壤稳定性磷含量变化特征

Fig. 3　Characteristics of changes in soil stability phosphorus content in *Larix gmelinii* forest with different understorey vegetation

2.3　影响因子分析

以大兴安岭北部地区 4 种不同林下植被兴安落叶松林 0—5,5—10,10—20 cm 土层 8 种形态磷、有效磷及全磷作为响应变量,土壤基本理化性质作为解释变量进行冗余分析(RDA)。DJL 土壤 8 种形态磷、有效磷及全磷与基本理化性质之间第 1 轴对所有的解释变量解释度为 77.91%,第 2 轴解释度为 15.61%(图 5a);SWC、MBN、MBP、MBC、DON、DOC 及 NH_4^+—N 与响应变量呈显著正相关($p<0.05$),ST 与响应变量呈显著负相关($p<0.05$),pH 与响应变量呈负相关,但差异不显著($p>0.05$),其中 SWC 贡献度最高,为 68.70%($p=0.002$);DXL 第 1 轴解释度为 79.73%,第 2 轴解释度为 14.36%(图 5b),SWC、MBC、MBP、DOC、DON 与响应变量呈显著正

相关，pH 与响应变量呈负相关，影响磷组分变化的主要因子为 SWC，贡献度为 64.20%（$p=0.002$）；TCL 第 1 轴解释度为 75.25%，第 2 轴解释度为 12.05%（图 5c），DOC、MBC、DON、MBN、MBP 及 NH_4^+—N 与响应变量呈显著正相关（$p<0.05$），pH 与响应变量呈负相关（$p>0.05$），DOC 为 TCL 土壤磷组分变化的主要因子，贡献度为 67.40%（$p=0.002$）；TXL 第 1 轴解释度为75.88%，第 2 轴解释度为 13.42%（图 5d），NH_4^+—N、MBC、SWC 与响应变量呈显著正相关（$p<0.05$），pH 与响应变量呈显著负相关（$p<0.05$），NH_4^+—N 含量变化为 TCL 土壤磷组分变化的主要因子，贡献度为76.70%（$p=0.002$）。



注：TP 为全磷；AP 为有效磷；PAC 为磷活化系数。下同。

图 4 不同林下植被兴安落叶松林土壤全磷、有效磷及磷活化系数变化特征

Fig. 4 Characteristics of changes in total phosphorus, available phosphorus and phosphorus activation coefficient of soil in *Larix gmelinii* forest with different understory vegetation

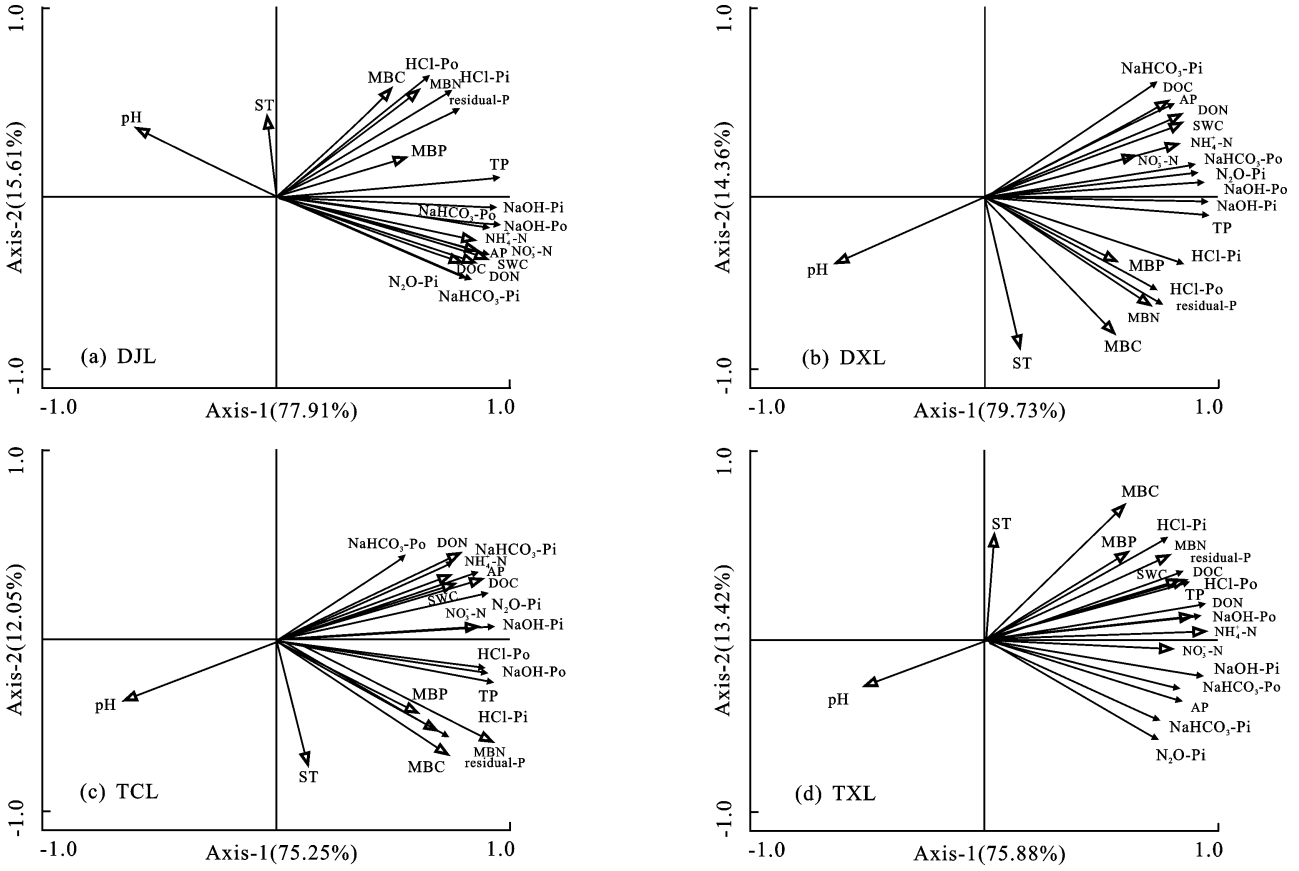
3 讨论

3.1 林下植被对兴安落叶松林土壤磷组分的影响

土壤 TP 是土壤中各形态磷素的总和，反映土壤长期的供磷潜力。本研究中，4 种林下植被兴安落叶松林土壤全磷含量范围为 416.79～1 081.02 mg/kg，高于内蒙古大兴安岭地区兴安落叶松林（0.42～0.84 g/kg）[16]。土壤中等活性磷占全磷的 30.08%～52.80%，是土壤磷素的重要组成部分[22-23]。土壤 H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi 能快速补充土壤液相中的磷，被认为是活性无机磷[24]，$NaHCO_3$—Po 虽是有机磷，但其易溶解、易矿化为可供植物吸收利用的有效磷素，也属于活性磷[25]。本研究发现，6—8 月 4 种林下植被落叶松林土壤 H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi 及 $NaHCO_3$—Po 均呈降低趋势，由于大兴安岭地区 5—6 月是冻土融化的主要时间，一方面土壤反复冻融促进磷素的释放[26]，另一方面受凋落物分解的影

响[27]，导致 6 月土壤 H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi 及 $NaHCO_3$—Po 含量均较高，而 7—8 月处于植物生长季，植物自身生长发育需要大量磷素，导致 8 月土壤 H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi 含量降低，土壤 $NaHCO_3$—Po 为了满足植物生长发育的需求而加速矿化释放无机磷。王亚茹[28]也研究得出春季土壤 H_2O—Pi、$NaHCO_3$—Pi 含量较高，夏季较低的研究结果。植被演替往往伴随着土壤、气候环境的改变及生态系统的演化，可以通过植被构成的不同观察到生态系统的差异。不同植被通过不同的根际效应影响地球化学和生物过程，进而影响磷循环[29]。大兴安岭地区兴安落叶松依据不同的生境条件形成群丛组。

本试验选取的该地区 4 种林下植被兴安落叶松林中，兴安杜鹃、杜香均属于杜鹃花科灌木，根、茎、叶生物量均显著高于其他 2 种林下植被，根系分泌物可以显著提高土壤磷有效性[30]，而地上部分较高的生物量也加速土壤活性磷组分周转。同时兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林凋落物量较高，在适宜的土壤温湿度下，凋落物分解相对较快，而苔草—落叶松林、苔藓—落叶松林处于季节性淹水状态，过高的土壤水分造成土壤的厌氧环境，不利于微生物的代谢，凋落物分解受到限制[31]。凋落物分解产生的腐殖质在微生物分解作用下产生腐殖酸不仅增加磷酸盐溶解，而且与磷酸根离子竞争土壤吸附位点，使稳定形态的无机磷释放，提高土壤的供磷水平[32-33]。因此，兴安杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤 3 种活性磷组分含量高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林。



注：NH_4^+—N 为铵态氮；NO_3^- N 为硝态氮；DOC 为可溶性有机碳；DON 为可溶性有机氮；MBC 为微生物量碳；MBN 为微生物量氮；MBP 为微生物量磷；AP 为有效磷；TP 为全磷；SWC 为土壤含水量；ST 为土壤温度；pH 为土壤酸碱度。下同。

图 5　不同林下植被兴安落叶松林土壤磷形态与环境因子冗余分析

Fig. 5　Redundancy analysis of soil phosphorus patterns and environmental factors in *Larix gmelinii* forest with different understorey vegetation

中等活性磷一般吸附于土壤铁、铝化合物上，与土壤中的腐殖酸关系密切[11]。本研究中兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林较高的凋落物归还使得土壤有机碳含量增加，从而抑制游离的铁、铝化合物，增加非晶质氧化铁、铝的含量，使得土壤中等活性磷含量相对较高[32]。观测期间，兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林土壤 NaOH—Po 含量在 6—10 月降幅高于其他 2 种落叶松林，这是由于这 2 种林型的凋落物数量高，土壤温、湿度在一个适当的水平，微生物活性状态较好[31]，导致土壤 NaOH—Po 矿化程度高。因此，适宜的温、湿度条件和更好的通气条件有利于提高有机磷的矿化为有效性更高的形态[34]。

土壤稳定性磷主要包含HCl—P和residual—P，这些磷主要存在于岩石中的矿物中，在较长的时间尺度上可以通过风化、矿化和解吸等生物和地球化学过程转化为土壤中的有效磷[35]。在观测期间苔草—落叶松林6—10月各土层土壤HCl—Pi、HCl—Po和residual—P含量均显著高于其他3种林型，可能是因为苔草—落叶松林处于季节性淹水状态，且位于多年冻土区，土壤含水量高，土壤温度较低，而湿冷的环境条件使得有机物转化为无机物的速度减慢，导致有机磷的累积[36]，难利用磷含量较高。根系作为植物汲取养分的主要器官之一，分泌部分有机酸，增强其他磷组分的活化与矿化[37]，苔草—落叶松林根系相对较浅，因此苔草—落叶松林土壤有机磷等难利用活化程度较低，稳定性磷含量高于其他3种落叶松林。

3.2 林下植被对兴安落叶松林土壤有效磷的影响

土壤有效磷含量是反映土壤磷素有效性的重要指标[22]。6—10月杜鹃—兴安落叶松林和杜香—落叶松林各土层土壤活性磷呈降低趋势，而苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林5—20 cm土层在10月呈现增加趋势，这可能是由于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林处于季节性水淹状态，导致在10月深层土壤有效磷的输入高于输出。不同林下植被落叶松林，土壤有效磷含量平均值表现为兴安杜鹃—落叶松林、杜香落叶松林高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林，这与王冰等[17]得出的研究结果相似。

土壤PAC代表土壤磷素活化能力及其有效性，PAC系数越大说明全磷—有效磷转化效率越高。研究[38]表明，当PAC＞2%时，土壤磷有效性较高。4种林下植被兴安落叶松林土壤PAC为1.62%～7.76%，总体表现出较高的转化效率。由于兴安杜鹃、杜香根系较为发达，根系对磷组分的活化与矿化程度高于苔草、苔藓[37]，因此兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林土壤PAC高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林。这也充分反映我国寒温带不同林下植被兴安落叶松林土壤磷有效性不同，其中杜鹃—落叶松林和杜香—落叶松林土壤磷的有效性较高。

3.3 环境因子对土壤磷组分和有效性的影响

有研究[17]表明，兴安落叶松林下植被不同导致土壤基本理化性质存在差异。而土壤磷组分、有效磷、全磷含量与土壤有机碳、含水率pH等基本理化性质呈显著相关[1]。研究[39]表明，当植被类型存在不同时，驱动土壤磷组分含量的环境因素也存在差异，本研究中RDA分析也表明，兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林土壤磷组分和有效磷的主要影响因子为SWC，苔草—落叶松林主要影响因子为DOC，苔藓—落叶松林主要影响因子为NH_4^+—N。张磊等[37]研究也证明，土壤磷组分的变化主要受土壤氮素、SWC的影响，本研究中土壤磷组分与SWC呈正相关关系，土壤水分是微生物活性的重要保证之一，适宜的水分提高微生物活性，进而促进磷的释放。同时，水分的聚集导致土壤厌氧环境的形成，加强Fe、Al元素对土壤磷素的吸附[11]。土壤氮素是土壤有机质的重要组成部分，本研究中土壤NH_4^+—N与8种形态磷组分呈正相关关系，曾晓敏[39]研究发现，氮素是导致磷组分含量变化的主要驱动因素之一，是因为氮素是微生物的主要构成元素之一；另外，充足的氮素也增强微生物的活性，对土壤磷素进行水解，促进活性磷的生成。本研究中土壤DOC与土壤磷组分之间呈正相关关系，贾淑娴等[40]研究表明，土壤DOC含量的变化是土壤磷有效性的重要影响因素，当凋落物输入较少时，土壤可溶性碳含量降低，土壤保留P的能力下降。4种林下植被兴安落叶松林土壤pH与8种形态磷、有效磷、全磷含量均呈负相关，表明pH的降低不仅可以促进磷素的溶解，而且可以增加土壤对磷素的吸附量[41]。

4 结论

(1)观测期间兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林土壤活性磷和中等活性磷较高，苔草—落叶松林土壤稳定性磷较高。

(2)兴安杜鹃—落叶松林、杜香—落叶松林土壤有效磷含量及磷活化系数高于苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林，表现出较高的磷有效性，苔草—落叶松林和苔藓—落叶松林在8月和10月5—10，10—20 cm土层表现出供磷不足现象。

(3)土壤含水率、可溶性碳和铵态氮是兴安落叶松林土壤磷形态和有效磷含量的主要影响因素。

林下植被是森林生态系统重要组成部分，林下植被的差异对土壤理化性质及养分有效性产生显著影响，因此，林下植被的作用可作为森林生态系统土壤养分研究的重要内容，为我国寒温带地区森林生态系统土壤养分有效性及养分循环研究提供帮助。

参考文献：

[1] 方晰，陈金磊，王留芳，等.亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J].中南林业科技大学学报，2018，38(12)：1-12.
FANG X, CHEN J L, WANG L F, et al. Research progress on soil phosphorus availability and its influential factors in subtropical forests[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2018, 38(12): 1-12.

[2] HAN Y, CHEN X W, WANG E H, et al. Optimum biochar preparations enhance phosphorus availability in amended Mollisols of Northeast China [J]. Chilean Journal of Agricultural Research,2019,79(1):153-164.

[3] 孟会生,洪坚平,杨毅,等.配施磷细菌肥对复垦土壤细菌多样性及磷有效性的影响[J].应用生态学报,2016,27(9):3016-3022.
MENG H S, HONG J P, YANG Y, et al. Effect of applying phosphorus bacteria fertilizer on bacterial diversity and phosphorus availability in reclaimed soil[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(9):3016-3022.

[4] CAO N, CHEN X P, CUI Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2012,94(2):161-170.

[5] 周诗朝.林下植被对杨树人工林生长、土壤性状和根系特征的影响[D].南京:南京林业大学,2023.
ZHOU S C. Effect of understory vegetation on poplar growth, soil properties and poplar root characteristics in poplar plantations[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2023.

[6] 王小平,杨雪,杨楠,等.凋落物多样性及组成对凋落物分解和土壤微生物群落的影响[J].生态学报,2019,39(17):6264-6272.
WANG X P, YANG X, YANG N, et al. Effects of litter diversity and composition on litter decomposition characteristics and soil microbial community[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(17):6264-6272.

[7] LANDUYT D, DE LOMBAERDE E, PERRING M P, et al. The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world [J]. Global Change Biology,2019,25(11):3625-3641.

[8] 佘婷,田野.森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J].生态科学,2020,39(1):213-223.
SHE T, TIAN Y. Effects of litter diversity on decomposition process and soil microbial characteristics in forest ecosystems [J]. Ecological Science, 2020, 39 (1): 213-223.

[9] WANG B, VERHEYEN K, BAETEN L, et al. Herb litter mediates tree litter decomposition and soil fauna composition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 152:e108063.

[10] ZEDERER D P, TALKNER U, SPOHN M, et al. Microbial biomass phosphorus and C/N/P stoichiometry in forest floor and A horizons as affected by tree species [J].Soil Biology and Biochemistry,2017,111:166-175.

[11] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils[J].Catena,2017,149:385-393.

[12] 翟政,田野,秦广震,等.杨树人工林林下植被对非生长季土壤磷素形态与转化的影响[J].生态学杂志,2021,40(12):3778-3787.
ZHAI Z, TIAN Y, QIN G Z, et al. Effects of understory vegetation on soil phosphorus fraction and availability in nongrowing season in poplar plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40 (12): 3778-3787.

[13] SAND-JENSEN K, JØRGENSEN H, LARSEN J R. Long-term influence of hay-cutting on plant species richness, biodiversity and soil fertility in a Danish Fen[J]. Ecological Engineering,2019,134:93-100.

[14] 杨起帆.基于林下植被异质性的杉木人工林土壤磷组分特征研究[D].福州:福建农林大学,2022.
YAND Q F. Characteristics of soil phosphorus fractions under the heterogeneous understory vegetations in a Chinese fir plantation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2022.

[15] 孙广友.试论沼泽与冻土的共生机理:以中国大小兴安岭地区为例[J].冰川冻土,2000,22(4):309-316.
SUN G Y. Discussion on the symbiotic mechanisms of swamp with permafrost: Taking Da-Xiao Hinggan Mountains as examples [J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology,2000,22(4):309-316.

[16] 杨林.内蒙古大兴安岭兴安落叶松林植物—土壤生态化学计量特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
YANG L. Study on plant-soil eco-stoichiometry characteristics of *Larixgmelinii* in Daxing'an Mountains Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2020.

[17] 王冰,张鹏杰,张秋良.不同林型兴安落叶松林土壤理化特征[J].西北林学院学报,2021,36(6):65-71.
WANG B, ZHANG P J, ZHANG Q L. Soil physicochemical characteristics of *Larix gmelinii* forest with different forest types[J].Journal of Northwest Forestry University,2021,36(6):65-71.

[18] 高明磊,满秀玲,段北星.林下植被和凋落物对寒温带森林生长季土壤 CH_4 通量的影响[J].生态学报,2021,41(24):9886-9897.
GAO M L, MAN X L, DUAN B X. Effects of understory vegetation and litter on soil CH_4 flux during growing season in cold temperate forest in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(24):9886-9897.

[19] SUI Y B, THOMPSON M L, SHANG C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J]. Soil Science Society of America Journal,1999,63(5):e1174.

[20] WANG J C, REN C Q, CHENG H T, et al. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: Consequences for soil phosphorus forms and microbial community[J].The Science of the Total Environ-

ment,2017,595:769-778.

[21] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal,1982,46(5):e970.

[22] 张鑫,谷会岩,陈祥伟.择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):441-448.
ZHANG X, GU H Y, CHEN X W. Effects of selective cutting on soil phosphorus forms and availability in Korean pine broad-leaved forest in Xiaoxing'an Mountains of China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(2):441-448.

[23] 春雪.大兴安岭重度火烧迹地植被恢复后土壤磷有效性及其影响因素分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
CHUN X. Analysis soil phosphorus availability and its influence factors after vegetation restoration from seriously burning in Greater Khingan Mountain areas, China[D].Harbin: Northeast Forestry University,2020.

[24] ROSE T J, HARDIPUTRA B, RENGEL Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J].Plant and Soil,2010,326(1):159-170.

[25] CROSS A F, SCHLESINGER W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J].Geoderma,1995,64(3/4):197-214.

[26] FREPPAZ M, WILLIAMS B L, EDWARDS A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability[J].Applied Soil Ecology,2007,35(1):247-255.

[27] 张頔,满秀玲,刘思琪,等.寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放[J].北京林业大学学报,2022,44(3):65-74.
ZHANG D, MAN X L, LIU S Q, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone[J]. Journal of Beijing Forestry University,2022,44(3):65-74.

[28] 王亚茹.不同杨树人工林类型下土壤磷淋失特征的研究[D].南京:南京林业大学,2021.
WANG Y R. Effects of different poplar plantation types on soil phosphorus leaching characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2021.

[29] 张金昕,高良敏,庞振东,等.低分子有机酸对林地土壤磷释放及活化影响[J].科学技术与工程,2022,22(24):10470-10477.
ZHANG J X, GAO L M, PANG Z D, et al. Effects of low-molecular organic acids on soil phosphorus release and activation in woodland[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(24):10470-10477.

[30] FU D G, WU X N, DUAN C Q, et al. Different life-form plants exert different rhizosphere effects on phosphorus biogeochemistry in subtropical mountainous soils with low and high phosphorus content[J]. Soil and Tillage Research,2020,199:e104516.

[31] 汪方芳,闫家国,马旭,等.黄河口盐沼湿地盐地碱蓬和互花米草凋落物的分解特征[J].自然资源学报,2020,35(2):480-492.
WANG F F, YAN J G, MA X, et al. Decomposition characteristics of vegetation litter of *Suaeda salsa* and *Spartina alterniflora* in saltmarsh of the Yellow River Estuary, China[J].Journal of Natural Resources,2020,35(2):480-492.

[32] 孙桂芳,金继运,石元亮.腐殖酸和改性木质素对土壤磷有效性影响的研究进展[J].土壤通报,2011,42(4):1003-1009.
SUN G F, JIN J Y, SHI Y L. Advances in the effect of humic acid and modified lignin on availability to crops[J].Chinese Journal of Soil Science,2011,42(4):1003-1009.

[33] AHMED W, HUANG J, KAILLOU L, et al. Changes in phosphorus fractions associated with soil chemical properties under long-term organic and inorganic fertilization in paddy soils of Southern China[J]. PLoS One,2019,14(5):e0216881.

[34] 李蕴慧.中高纬湿地磷的累积及环境指示意义[D].长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2022.
LI Y H. Accumulation and paleoenvironmental implications of phosphorus in mid-high latitude peatlands, Northeast Chin[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences),2022.

[35] 杨小燕,陈祥伟.未开垦干扰黑土土壤磷素形态垂直分布特征[J].土壤通报,2016,47(2):378-383.
YANG X Y, CHEN X W. Vertical distribution of soil phosphorus fractionation in uncultivated black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science,2016,47(2):378-383.

[36] 夏建国,仲雨猛,曹晓霞.干湿交替条件下土壤磷释放及其与土壤性质的关系[J].水土保持学报,2011,25(4):237-242,248.
XIA J G, ZHONG Y M, CAO X X. Relation between phosphorous release and soil character with alternative dry-wet conditions[J].Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(4):237-242,248.

(下转第363页)

nese Journal of Soil Science,2018,49(2):283-292.

[20] BISHOP T F A, MCBRATNEY A B, LASLETT G M. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines[J].Geoderma,1999,91(1/2):27-45.

[21] LIU F, WU H Y, ZHAO Y G, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. Science Bulletin,2022,67(3):328-340.

[22] 张世文,宁汇荣,高会议,等.基于各向异性的区域土壤有机碳三维模拟与空间特征分析[J].农业工程学报,2016,32(16):115-124.
ZHANG S W, NING H R, GAO H Y, et al. Three-dimensional simulation and spatial characteristics of soil organic carbon based on anisotropy in region[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(16):115-124.

[23] 贺勇,胡克林,李卫东,等.华北冲积平原区土壤剖面质地层次空间分布的三维随机模拟[J].土壤学报,2008,45(2):193-200.
HE Y, HU K L, LI W D, et al. Stochastic simulation of three-dimensional spatial distribution of soil profile textural layers in alluvial plain, North China[J]. Acta Pedologica Sinica,2008,45(2):193-200.

[24] 陈冲,胡克林,贺勇.农田土壤质地空间分布的三维随机模拟及其不确定性评价[J].土壤,2013,45(2):1319-1325.
CHEN C, HU K L, HE Y. 3-D stochastic simulation and uncertainty assessment of soil texture at field scale [J].Soils,2013,45(2):1319-1325.

[25] 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等.沿海滩涂土壤盐分空间分布的三维随机模拟与不确定性评价[J].农业工程学报,2010,26(11):91-97.
YAO R J, YANG J S, ZHAO X F, et al. Three-dimensional stochastic simulation and uncertainty assessment on spatial distribution of soil salinity in coastal region [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(11):91-97.

[26] 李洪义,史舟,唐惠丽.基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究[J].土壤学报,2010,47(2):359-363.
LI H Y, SHI Z, TANG H L. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary Kriging method [J].Acta Pedologica Sinica,2010,47(2):359-363.

[27] 张忠启,史学正,于东升,等.红壤区土壤有机质和全氮含量的空间预测方法[J].生态学报,2010,30(19):5338-5345.
ZHANG Z Q, SHI X Z, YU D S, et al. Spatial prediction of soil organic matter and total nitrogen in the hilly red soil region, China[J].Acta Ecologica Sinica,2010,30(19):5338-5345.

[28] 郭龙,张海涛,陈家赢,等.基于协同克里格插值和地理加权回归模型的土壤属性空间预测比较[J].土壤学报,2012,49(5):1037-1042.
GUO L, ZHANG H T, CHEN J Y, et al. Comparison between co-kriging model and geographically weighted regression model in spatial prediction of soil attributes [J].Acta Pedologica Sinica,2012,49(5):1037-1042.

(上接第 350 页)

[37] 张磊,贾淑娴,李啸灵,等.亚热带米槠天然林凋落物和根系输入变化对土壤磷组分的影响[J].生态学报,2022,42(2):656-666.
ZHANG L, JIA S X, LI X L, et al. Effects of litter and root inputs changes on soil phosphorus fractions ina subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii* [J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(2):656-666.

[38] 贾兴永,李菊梅.土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J].中国土壤与肥料,2011(6):76-82.
JIA X Y, LI J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2011(6):76-82.

[39] 曾晓敏.亚热带典型森林植被类型下土壤磷素特征及其影响因素[D].福州:福建师范大学,2020.
ZENG X M. Characteristics of soil phosphorus under typical vegetation types in subtropical forests and the affecting factors[D].Fuzhou: Fujian Normal University,2020.

[40] 贾淑娴,吴传敬,刘小飞,等.采伐剩余物的处理方式对杉木幼林土壤磷组分及其有效性的影响[J].应用生态学报,2019,30(11):3662-3670.
JIA S X, WU C J, LIU X F, et al. Effects of harvest residue treatments on soil phosphorus fractions and availability in a young Chinese fir plantation[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(11):3662-3670.

[41] 苏莹莹.环太湖林带磷素时空变异及土壤吸附作用研究[D].南京:南京林业大学,2012.
SU Y Y. Study on the spatial-temporal variablity of phosphorus and soil adsorption in forest belt surrounding Taihu Lake [D]. Nanjing: Journal of Nanjing Forestry University,2012.