林业科学研究 2018,31(6):175～184
Forest Research

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2018.06.024

昆嵛山不同林分类型土壤质量状况及评价

邵国栋[1], 艾娟娟[1], 孙启武[1]*, 董玉峰[2], 李建伟[3]

(1.中国林业科学研究院林业研究所,国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091;
2.山东省林业科学研究院,山东 济南 250014;3.山东省烟台市昆嵛山林场,山东 烟台 264100)

摘要:[**目的**]探究昆嵛山国家级自然保护区内4种不同林分类型(日本落叶松林、蒙古栎-日本落叶松混交林、赤松林、杉木林下土壤质量状况。[**方法**]采用野外调查结合室内分析的方法,对不同林分下土壤剖面各层次土壤理化及生物学性质进行测定分析,运用土壤质量综合指数法结合主成分分析对不同林分土壤质量进行综合分析与评价。[**结果**]随土层深度的加深,不同林分土壤密度随之增加,总孔隙度随之显著降低($P<0.05$);日本落叶松林、赤松林土壤毛管孔隙度均随土层深度增加而显著减小,蒙古栎-日本落叶松混交林、杉木林反之;不同林分土壤pH值均介于4.13～5.07之间,为酸性土壤;有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾含量总体上均呈随土层深度增加而降低的趋势,呈现出土壤养分的表聚性特征;4种林分各土层全钾含量总体上无显著差异($P<0.05$),日本落叶松林20～40 cm、40～60 cm层土壤全钾含量(2.22 g·kg^{-1}和2.34 g·kg^{-1})显著高于其他林分;除杉木林外,其他林分各土层有效磷含量均随土层深度增加而增加;除土壤蔗糖酶外,其余3种土壤酶活性在不同林分中均随土层深度的增加而减小;4种林分土壤质量综合指数大小排序为:日本落叶松林(0.792)>蒙古栎-日本落叶松混交林(0.639)>杉木林(0.353)>赤松林(0.267)。[**结论**]不同林分对土壤剖面各层次理化性质影响显著,不同林分类型土壤质量状况各异,其中日本落叶松林土壤质量最好,赤松林土壤质量最次。

关键词:昆嵛山;森林土壤;土壤剖面;林分类型;土壤质量

中图分类号:S714.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1498(2018)06-0175-10

Soil Quality Status and Assessment of Different Forest Types in Kunyushan Mountains

SHAO Guo-dong[1], *AI Juan-juan*[1], *SUN Qi-wu*[1], *DONG Yu-feng*[2], *LI Jian-wei*[3]

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, State Key Laboratory of Forestry Genetics and Tree Breeding, Beijing 100091, China;
2. Shandong Forestry Academy, Jinan 250014, Shandong, China; 3. Kunyushan Forest Farm, Yantai 264100, Shandong, China)

Abstract: [**Objective**] To explore the soil quality under the four forest types (*Larix kaempferi*, *Quercus mongolica* + *Larix kaempferi*, *Pinus densiflora*, and *Cunninghamia lanceolata*) in Kunyushan National Nature Reserve. [**Method**] Using the method of soil sampling combined with laboratory analysis, the physical and chemical properties and enzyme activities in different soil profiles under these forests were analyzed. The comprehensive analysis and evaluation of soil quality under different forest types were conducted by integrated soil quality index and principal component analysis. [**Result**] The soil density of different forests increased with the increase of soil depth, and the total porosity decreased significantly ($P<0.05$). The capillary porosity of *L. kaempferi* and *P. densiflora* were significantly reduced with the increase of soil depth, while the *Q. mongolica* + *L. kaempferi* and *C. lanceolata* were the opposite. The soil pH ranged from 4.13 to 5.07. The contents of soil organic matter, total nitrogen, total phos-

收稿日期: 2017-03-09 修回日期:2018-01-10
基金项目: 国家科技基础性工作专项——中国森林土壤调查、标准规范及数据库构建(2014FY120700)
作者简介: 邵国栋(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土壤质量演变与调控. E-mail:guodongshao@126.com
* 通讯作者:孙启武, 副研究员,主要研究方向:人工林土壤质量演化与调控、土壤肥力与植物营养等. E-mail:sqw@caf.ac.cn

phorus, available nitrogen, and available potassium generally decreased with the increasing of soil depth, reflecting the surface aggregation characteristic of soil nutrient. On the whole, the soil total potassium content had no significant differences in different soil layers under four forest types ($P<0.05$), the soil total potassium content in 20 – 40 cm and 40 ~ 60 cm layers of *L. kaempferi* were significantly higher than that of other forests. In addition to *C. lanceolata*, the soil available phosphorus content increased as soil depth increased. Except for soil invertase, the activity of other three soil enzyme decreased with the increase of soil depth. The soil quality index of these forests showed an order of *L. kaempferi*(0.792) > *Q. mongolica* + *L. kaempferi* (0.639) > *C. lanceolata* (0.353) > *P. densiflora* (0.267). [**Conclusion**] Forest type has a significant impact on the physical and chemical properties at different levels of the soil layers. The soil quality status of different forest types is different, among them, the soil quality of *L. kaempferi* forest is the best, and the soil quality of *P. densiflora* forest is the worst.

Keywords: Kunyushan Mountains; forest soil; soil profile; forest type; soil quality

土壤质量是土壤在生态系统范围内,维持生物生产力、保护环境质量和促进动植物健康的能力[1],是土壤物理、化学及生物学属性的综合体现[2-3]。森林土壤是森林生态系统的重要组成部分,为森林植被提供必需的水、肥、气、热等生存条件,是森林植被存在和生长的基底,也是森林生态系统营养元素转化的重要枢纽,对森林的健康发展有着关键的作用[4-6]。森林土壤质量影响着林木和林下植物的健康状况,近年来,随着森林土壤在森林生态系统中的作用日益突出[7-9],研究不同林分类型下土壤质量状况,可为森林的健康经营及森林土壤资源的可持续利用提供重要科学依据。

目前,国内外学者已从土壤理化性质[10-13]、酶活性[14]等多个方面对不同植被类型下土壤质量评价做了大量研究。近年来对昆嵛山的相关研究主要集中在土壤发生[15]、植被多样性[16]等方面,而有关对昆嵛山国家自然保护区不同林分下土壤质量评价的研究还鲜见报道。因此本研究以昆嵛山林区4种不同林分下的土壤为研究对象,通过对样地林分的调查以及土壤各剖面样品的采集、理化性质的测定,分析土壤剖面不同层次以及不同林分下的土壤肥力差异特征,以期为昆嵛山自然保护区森林生态系统的可持续健康经营与管理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

研究区域位于山东省烟台市东部的昆嵛山自然保护区(121°41′34″~121°48′04″ E,37°11′50″~37°17′22″ N),昆嵛山属长白山系,崂山山脉,山体呈东西走向,地貌属低山丘陵,主峰泰礴顶,海拔923 m,属暖温带季风气候,年均温11.9℃,月均温最高在7月,最低在1月,绝对最高气温37.2℃,绝对最低气温 –14.7℃,年均降水量984.4 mm,主要集中在6—9月。山体主要以花岗岩为主,片麻岩和石英斑岩亦有分布。土壤以棕壤为主,局部有少量山地草甸土,质地以砂壤为主。昆嵛山自然保护区植物种类丰富,森林覆盖率达到90% 以上,是以赤松(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)为主要保护对象的森林生态类型自然保护区,森林植被主要以赤松为主,此外还广泛分布有日本落叶松(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)、红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)等针叶树种,盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、水榆花楸(*Sorbus alnifolia* (Sieb. et Zucc.) K. Koch)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)等阔叶树种,该保护区作为胶东半岛的绿色资源和重要水源地,是山东省第一个森林生态类型的国家级自然保护区。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及林分调查 2015年11月,在昆嵛山自然保护区昆嵛山林场3分场,根据不同海拔及植被的分布情况,选择4种具有代表性的林分:日本落叶松林(Ⅰ)、蒙古栎 – 日本落叶松混交林(Ⅱ)、赤松林(Ⅲ)、杉木林(Ⅳ),各样地概况见表1。每种林分设3个20 m×20 m的标准样地,调查标准样地内优势树种、树高、胸径、郁闭度、草本盖度等指标,同时记录标准样地的地理位置、坡度、坡向等。

1.2.2 土壤样品采集及处理 在每个标准样地内坡上、坡中、坡下位置,分别挖掘土壤剖面3个,根据土壤颜色、结构、质地、石砾含量、紧实度等特征的不

表 1　研究样地基本概况

Table 1　Basic information of experimental plots

林分 Stands	地理位置 Position coordinates	海拔 Altitude /m	坡度 Slope /°	坡向 Aspect /°	草本盖度 Herb cover/%	郁闭度 Canopy density /%	平均树高 Average height /m	平均胸径 Average DBH/cm	林分密度 Stand density /(株·hm^{-2})	土壤类型 Soil types	剖面发生层次及深度 Soil layer and depth/cm
Ⅰ	37°14′51.3″ N 121°46′12.8″ E	904	30	西北 North west	30	98	8.10	16.34	975	暗棕壤 Dark brawn earths	A: 0～35 B: 35～53 BC: 53～100
Ⅱ	37°14′56.3″ N 121°45′35.9″ E	828	30	北 North	45	95	5.99	16.36	725	棕壤 Brawn earths	A: 0～25 B: 25～40 C: >40
Ⅲ	37°14′18.0″ N 121°45′18.6″ E	606	30	西 West	60	80	7.23	12.28	1 050	棕壤 Brawn earths	A: 0～15 B: 15～38 BC: 38～55
Ⅳ	37°14′28.4″ N 121°45′9.9″ E	454	45	西 West	40	95	12.34	13.34	1 225	棕壤 Brawn earths	A: 0～15 B: 15～43 C: 43～65

注:Ⅰ:日本落叶松林;Ⅱ:蒙古栎-日本落叶松混交林;Ⅲ:赤松林;Ⅳ:杉木林。

Note: Ⅰ: *Larix kaempferi*; Ⅱ: *Quercus mongolica* + *Larix kaempferi*; Ⅲ: *Pinus densiflora*; Ⅳ: *Cunninghamia lanceolata*.

同,划分土壤剖面的层次,观察记录土壤剖面的深度、紧实度、结构、颜色、质地、湿度、根量、石砾含量等,并按照划分的土层分层取样,将各层土样混合均匀采用四分法取约 1 kg 装入布袋中并贴好标签,同时用 100 cm^3 环刀按 0～20 cm、20～40 cm 进行原状土采样(由于 40 cm 以下土层石砾含量较多,取样误差较大会导致土壤水分物理性质测定数据可信度降低,因此只采集 40 cm 以上 2 层),用于土壤密度及含水量的测定,将采集完毕的土样带回实验室自然风干,剔除土样中树根、石块等杂物后,研磨过筛,装入自封袋,编号、贴标签后保存,待测。

1.2.3　样品测定　土壤密度(SD)、毛管孔隙度(CP)、非毛管孔隙度(NCP)、总孔隙度(SP)、最大持水量(MMC)采用环刀法;土壤 pH 采用电位法(水∶土 = 2.5∶1);土壤有机质(SOM)采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化—外加热法;全氮(TN)采用硫酸铜—硫酸钾—硫酸消煮法;全磷(TP)采用硝酸—盐酸—氢氟酸微波消解—ICP 法,全钾(TK)采用硝酸—盐酸—氢氟酸微波消解—ICP 法;有效磷(AP)采用氟化铵—盐酸浸提—流动分析仪法;水解性氮(AN)采用碱解—扩散法;速效钾(AK)采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度计法[17];土壤脲酶(URE)活性采用 3,5- 二硝基水杨酸比色法;磷酸酶(PHO)活性采用高锰酸钾滴定法[18];蔗糖酶(INV)、过氧化氢酶(CAT)采用酶活性测定试剂盒(分光光度法)测定。

1.3　土壤质量评价方法

土壤质量指数(SQI)评价法是近年来在土壤质量定量评价中被广泛应用的分析方法,该方法首先需要选择对外界环境较为敏感的土壤指标[19],采用主成分分析法[20-22]对选取的指标进行降维处理,根据得出的每个主成分因子的值筛选部分指标进入最小数据集(minimum data set,MDS)[23]。在用主成分分析计算各土壤指标的因子载荷过程中,虽然简化了数据结构,同时会导致部分土壤信息的丢失,为避免这一缺陷,引入 Norm 值来解决这一问题,Norm 值越大表明其解释总体土壤质量信息的能力越强,其计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i}^{k} (U_{ik}^2 \lambda_k)}$$

式中 *Norm* 值 N_{ik} 为第 i 个变量在特征值 > 1 的前 k 个主成分上的综合载荷,U_{ik} 为第 i 个变量在第 k 个主成分上的载荷,λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

其次将进入最小数据集的指标进行标准化处理,利用函数模型计算指标隶属度和权重,实现对各土壤性质的量纲归一化,使评价指标间具有可比性。本研究根据选择的指标在土壤中的功能和性质,隶属度值计算分为两种方法[24],公式如下:

$$M_i = \frac{X_i - X_{imin}}{X_{imax} - X_{imin}} \text{ 升型}$$

$$M_i = \frac{X_{imax} - X_i}{X_{imax} - X_{imin}} \text{ 降型}$$

式中,M_i 表示第 i 项土壤质量评价指标的隶属度值;X_i 表示各土壤质量评价指标分析测定值;X_{imax} 和 X_{imin} 分别表示第 i 项土壤质量评价指标分析测定

值中的最大值和最小值。

因土壤各指标对土壤质量的影响存在差异性，所以通过权重系数表征各指标的重要程度。本研究根据主成分分析分别计算土壤质量指标的主成分负荷量、方差贡献率和积累方差贡献率，进而计算各土壤质量指标在土壤质量评价中的权重：

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^{n} C_i$$

式中，W_i 表示第 i 个土壤质量评价指标的权重；C_i 为第 i 个土壤质量评价指标因子荷载。

最后，利用筛选出的各指标计算出土壤质量综合指数，其计算公式为：

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} W_i M_i$$

式中，SQI 为土壤质量综合指数；n 为指标个数；W_i 和 M_i 分别为第 i 个指标的权重系数和隶属度。当 SQI 为0时，表示土壤质量最差；SQI 数值越大，土壤质量越高。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 对数据进行统计和分析。为方便比较不同林分土壤性质随土层的变化规律以及土壤质量评价指标的计算，采用综合加权平均法对所有土壤指标按照发生层次测到的结果换算成0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤厚度数据。采用单因素方差分析（One-way ANOVA）法和 Duncan 新复极差法对不同林分类型下不同土层土壤指标进行方差分析和差异显著性检验（$P<0.05$），运用 Pearson 法分析全部土壤指标之间的相关性，主成分分析法计算不同林分土壤质量综合指数。

2 结果与分析

2.1 不同林分土壤剖面各层次物理性质

不同林分下土壤物理性质见表2。由表2可见，4种林分土壤密度均随土壤深度增加而增大，其中赤松林0～20 cm、20～40 cm 土壤密度均呈最大，分别为1.10 g·cm^{-3}、1.12 g·cm^{-3}，另外，除赤松林外，其余3种林分不同土层间土壤密度均存在显著差异（$P<0.05$）。与土壤密度变化规律相反，4种林分土壤总孔隙度随土壤深度增加而减小，其中日本落叶松林各层土壤总孔隙度呈最大，分别为73.12%、69.20%，各林分不同土层间土壤总孔隙度均存在显著差异。日本落叶松林、赤松林土壤毛管孔隙度均随土层深度增加而显著减小，蒙古栎－日本落叶松混交林、杉木林反之，其中日本落叶松林0～20 cm 最大，蒙古栎－日本落叶松混交林20～40 cm 最大，分别为48.58%、52.47%。非毛管孔隙度与毛管孔隙度变化规律相反，日本落叶松林0～20 cm、20～40 cm 土壤非毛管孔隙度均最大，分别为24.54 %、28.53 %。除赤松林外，其他3种林分土壤最大持水量均表现出随土层深度增加而减小的趋势，其中日本落叶松林0～20 cm、20～40 cm 土壤最大持水量均最大，分别为885.64 g·kg^{-1}、795.86 g·kg^{-1}。

表2 不同林分土壤各层次物理性质

Table 2 Physical properties of different soil layers in all stands

林分 Stands	土层 Soil layer /cm	土壤密度 Soil density /(g·cm^{-3})	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	最大持水量 Maximum moisture capacity/(g·kg^{-1})
Ⅰ	0～20	0.71±0.03b	48.58±0.81a	24.54±0.39b	73.12±0.08a	885.64±5.41a
	20～40	0.82±0.01a	40.67±0.95b	28.53±2.08a	69.20±0.03b	795.86±1.88b
Ⅱ	0～20	0.81±0.00b	48.01±0.67b	21.58±1.10a	69.59±0.04a	795.44±3.56a
	20～40	0.84±0.01a	52.47±1.80a	15.86±1.28b	68.33±0.02b	793.09±3.15a
Ⅲ	0～20	1.10±0.00a	43.10±1.01a	15.28±0.33b	58.38±0.01a	447.88±7.76b
	20～40	1.12±0.02a	39.46±1.62b	18.30±0.81a	57.76±0.03b	504.35±9.65a
Ⅳ	0～20	0.99±0.01b	46.32±1.96b	16.48±2.02a	62.80±0.04a	561.23±7.77a
	20～40	1.02±0.02a	49.02±1.00a	12.57±0.53b	61.59±0.02b	545.58±5.08b

注：同列不同小写字母表示同一林分不同土层间差异显著（$P<0.05$），下表同。

Note: Lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

2.2 不同林分土壤剖面各层次化学性质

不同林分下土壤化学性质见表3。从表3可以看出，4种林分土壤剖面各层 pH 值均介于4.13～5.50之间，属于酸性土壤。从土壤剖面垂直变化来看，4种林分 pH 值均随土壤深度的增加而增大，且0～40cm 土层之间存在显著差异（$P<0.05$），其中日本落叶松林随深度变化幅度最大，为32.93%。4种林分的有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量均随土层

深度增加而减小,且各土壤指标含量在 0 ～ 20 cm、20 ～ 40 cm、40 ～ 60 cm 土层中含量最高的林分均为日本落叶松林,有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量最高分别为 122.79 g · kg^{-1}、4.93 g · kg^{-1}、273.86 mg · kg^{-1}、133.28 mg · kg^{-1},其中有机质、全氮含量在各土层间表现出显著差异,除杉木林外,其余 3 种林分碱解氮含量随土层深度增加差异显著($P<0.05$),蒙古栎 - 日本落叶松混交林和杉木林各土层间速效钾含量差异显著。日本落叶松和杉木土壤全钾含量随土层深度增加而增加,但差异不显著($P<0.05$),而蒙古栎 - 日本落叶松混交林和赤松林土壤全钾含量随土层深度增加而降低,蒙古栎 - 日本落叶松林土壤全钾含量在 0 ～ 20 cm 与 20 ～ 40 cm 土层差异显著,赤松林土壤全钾含量在 20 ～ 40 cm 与 40 ～ 60 cm 土层差异显著。赤松和杉木林土壤全磷含量随土层增加而降低,赤松林全磷含量在不同土层差异显著,杉木林在 20 ～ 40 cm 于 40 ～ 60 cm 土层全磷含量差异显著;其余 2 种林分土壤全磷含量随土层增加而增加,各土层间含量无显著差异。除杉木林外,其余 3 种林分有效磷含量均随土层深度增加而增大,日本落叶松林各土层间有效磷含量差异显著,蒙古栎 - 日本落叶松混交林和赤松林 40 ～ 60 cm 有效磷含量均显著高于 0 ～ 20 cm、20 ～ 40cm 土层($P<0.05$)。

表 3　不同林分土壤各层次化学性质

Table 3　Chemical properties of different soil layers in all stands

林分 Stands	土层 Soil layer /cm	pH	有机质 Organic matte /(g · kg^{-1})	全氮 Total nitrogen /(g · kg^{-1})	碱解氮 Available nitrogen /(mg · kg^{-1})	全钾 Total potassium /(g · kg^{-1})	速效钾 Available potassium /(mg · kg^{-1})	全磷 Total phosphorus /(g · kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus /(mg · kg^{-1})
Ⅰ	0 ～ 20	4.13 ±0.01c	122.79 ±0.85a	4.93 ±0.03a	273.86 ±0.79a	2.17 ±0.07b	133.28 ±2.45a	0.74 ±0.00a	4.08 ±0.59c
	20 ～ 40	4.31 ±0.02b	109.26 ±0.64b	4.46 ±0.03b	243.87 ±1.18b	2.22 ±0.07ab	118.78 ±6.72a	0.76 ±0.01a	4.95 ±0.32b
	40 ～ 60	4.50 ±0.01a	61.60 ±0.26c	2.76 ±0.02c	131.39 ±3.02c	2.34 ±0.06a	67.76 ±0.68b	0.79 ±0.03a	8.40 ±0.05a
Ⅱ	0 ～ 20	4.25 ±0.04c	120.60 ±2.80a	4.89 ±0.13a	240.71 ±5.77a	2.19 ±0.19a	100.31 ±1.64a	0.79 ±0.19a	1.20 ±0.16b
	20 ～ 40	4.36 ±0.03b	104.83 ±1.07b	4.44 ±0.16b	131.27 ±8.05b	1.89 ±0.04b	67.16 ±0.41b	0.79 ±0.00a	1.25 ±0.21b
	40 ～ 60	4.45 ±0.03a	60.57 ±1.30c	2.60 ±0.05c	42.22 ±1.65c	1.85 ±0.02b	44.66 ±0.23c	0.81 ±0.05a	2.57 ±0.98a
Ⅲ	0 ～ 20	4.80 ±0.01b	59.28 ±2.70a	1.94 ±0.08a	40.78 ±6.12a	2.10 ±0.07a	80.26 ±6.83a	0.23 ±0.00a	2.60 ±0.16b
	20 ～ 40	5.03 ±0.04a	50.15 ±2.47b	1.60 ±0.04b	30.19 ±0.99b	2.07 ±0.04a	63.86 ±0.26a	0.21 ±0.01b	2.81 ±0.42b
	40 ～ 60	5.07 ±0.03a	37.79 ±1.81c	1.33 ±0.10c	21.31 ±0.79c	1.87 ±0.07b	59.86 ±3.74a	0.19 ±0.00c	4.01 ±0.00a
Ⅳ	0 ～ 20	4.65 ±0.08b	86.37 ±8.12a	2.89 ±0.07a	60.57 ±8.88a	2.06 ±0.04a	53.72 ±4.03a	0.37 ±0.01a	12.87 ±2.47a
	20 ～ 40	4.85 ±0.01a	71.00 ±1.65b	2.79 ±0.02b	55.25 ±4.74a	2.08 ±0.02a	46.53 ±3.51b	0.35 ±0.02a	8.37 ±1.43b
	40 ～ 60	4.95 ±0.00a	37.45 ±0.75c	1.38 ±0.04c	18.68 ±0.37b	2.13 ±0.04a	35.60 ±0.92c	0.23 ±0.01b	8.83 ±0.19b

2.3　不同林分土壤剖面各层次土壤酶活性

不同林分下土壤酶活性见表 4。从表 4 可以看出,除土壤蔗糖酶外,其余 3 种土壤酶活性在不同林分中均随土壤深度的增加呈降低趋势,其中蒙古栎 - 日本落叶松混交林 0 ～ 20 cm 土壤脲酶活性最高为 553.51 ug · g^{-1} · d^{-1},杉木林 40 ～ 60 cm 土壤脲

表 4　不同林分土壤各层次酶活性

Table 4　Enzyme activities of different soil layers in all stands

林分 Stands	土层 Soil layer/cm	脲酶 Urease/ (μg · g^{-1} · d^{-1})	蔗糖酶 Invertase / (mg · g^{-1} · d^{-1})	磷酸酶 Phosphatase/ (μmol · g^{-1} · d^{-1})	过氧化氢酶 Catalase/ (mg · g^{-1} · h^{-1})
Ⅰ	0 ～ 20	448.28 ±2.13a	49.50 ±2.50a	19.58 ±0.07a	3.45 ±0.03a
	20 ～ 40	346.51 ±5.19a	40.25 ±2.00b	18.90 ±0.18a	3.00 ±0.03b
Ⅱ	40 ～ 60	300.50 ±4.97b	9.35 ±0.50c	13.44 ±0.62b	1.32 ±0.01c
	0 ～ 20	553.51 ±9.83a	46.80 ±5.20a	18.41 ±0.22a	3.12 ±0.10a
	20 ～ 40	338.10 ±2.62b	31.95 ±5.65b	18.40 ±0.22a	2.19 ±0.05b
	40 ～ 60	280.83 ±6.39b	1.60 ±0.00c	15.15 ±1.78b	0.45 ±0.03c
Ⅲ	0 ～ 20	272.83 ±7.39a	10.25 ±1.00c	18.93 ±0.43a	2.85 ±0.09a
	20 ～ 40	192.42 ±3.71b	15.90 ±0.50b	19.21 ±0.99a	2.76 ±0.04a
	40 ～ 60	149.69 ±1.93c	19.50 ±0.50a	13.04 ±0.13b	1.80 ±0.03b
Ⅳ	0 ～ 20	229.38 ±6.26a	20.13 ±1.12a	10.73 ±0.17a	0.64 ±0.06a
	20 ～ 40	167.25 ±2.10b	10.00 ±0.00b	9.07 ±0.22b	0.50 ±0.05b
	40 ～ 60	117.66 ±1.81c	3.63 ±0.43c	5.08 ±1.31c	0.20 ±0.01c

酶活性最低,为 117.66 ug·g^{-1}·d^{-1},除日本落叶松林外,不同林分 0～20cm 和 20～40cm 土层间土壤脲酶活性差异性显著($P<0.05$);日本落叶松林 0～20 cm 土壤蔗糖酶活性最高,为 49.50 mg·g^{-1}·d^{-1},蒙古栎－日本落叶松混交林 40～60 cm 蔗糖酶活性最低,为 1.60 mg·g^{-1}·d^{-1},日本落叶松林、蒙古栎－日本落叶松混交林和杉木林不同土层间蔗糖酶活性随土层加深而显著减小($P<0.05$),赤松林则反之;日本落叶松林 0～20 cm 土壤磷酸酶酶活性最高,为 19.59 μmol·g^{-1}·d^{-1},杉木林磷酸酶活性最低,为 5.08 μmol·g^{-1}·d^{-1},杉木林不同土层间磷酸酶活性差异显著($P<0.05$);日本落叶松林 0～20 cm 土壤过氧化氢酶活性最高,为 3.45 mg·g^{-1}·h^{-1},杉木林 40～60 cm 过氧化氢酶活性最低,为0.20 mg·g^{-1}·h^{-1},除赤松林外,其他 3 种林分各土层间过氧化氢酶活性均存在显著性差异($P<0.05$)。

2.4 不同林分土壤质量综合评价

采用主成分分析对不同林分 17 种土壤质量评价指标分析结果见表5。结果表明,特征值大于1 的主成分有 3 个,累积方差贡献率达到88.471%,根据各主成分累积方差贡献率大于 85% 时即可反映系统的变异性信息,说明这 3 个主成分能够概括不同林分土壤质量差异的主要影响因素。通常情况下,主成分因子荷载越大,变量在其主成分中的权重越大[25],本研究中,把每个主成分中因子荷载≥0.5 的指标筛选出来。由表 5 可知,第 1 主成分中毛管孔隙度、总孔隙度、最大持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾、脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶具有较高的正荷载,土壤密度、pH 具有较高的负荷载,根据表 6 中各项土壤质量评价指标之间相关分析结果可知,毛管孔隙度、总孔隙度、最大持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、脲酶、蔗糖酶之间具有显著相关性($P<0.05$),土壤密度和 pH 具有显著相关性,因此在这些指标中选取因子荷载最大的最大持水量、pH 进入最小数据集,有机质、全氮、碱解氮、全磷、蔗糖酶 Norm 值相对也较高,且有机质对于土壤水分、通气性、抗蚀力、养分有效性以及微生物活性都具有明显影响,可以更综合地反映土壤质量状况,有机质、全氮、碱解氮、全磷、蔗糖酶也选择进入最小数据集;第 2 主成分中土全钾、速效钾、磷酸酶、过氧化氢酶具有较高的正荷载,速效钾、磷酸酶、过氧化氢酶具有显著相关性,因此在这些指标中选取因子荷载最大的过氧化氢酶进入最小数据集,全钾与其他指标间相关性不显著,全钾也进入最小数据集;同理,第 3 主成分中选取非毛管孔隙度、有效磷、磷酸酶进入最小数据集。综上分析,选取非毛管孔隙度、最大持水量、pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶进入最终的最小数据集作为土壤质量综合评价指标。

表 5 土壤质量指标的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of soil quality index

土壤质量指标 Soil quality index	主成分旋转载荷矩阵 Matrix of principal component rotation loadings			Norm 值 Norm value
	1	2	3	
土壤密度 Soil density	-0.885	0.148	-0.225	2.896
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.820	-0.441	-0.275	2.778
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	-0.077	0.408	0.542	1.030
总孔隙度 Total porosity	0.890	-0.273	-0.017	2.919
最大持水量 Maximum moisture capacity	0.976	-0.128	0.076	3.172
pH	-0.946	0.077	-0.161	3.077
有机质 Organic matter	0.939	-0.140	0.248	3.072
全氮 Total nitrogen	0.957	-0.184	0.181	3.127
碱解氮 Available nitrogen	0.968	0.152	0.155	3.155
全磷 Total phosphorus	0.954	-0.162	0.092	3.106
有效磷 Available phosphorus	-0.428	-0.222	0.812	1.822
全钾 Total potassium	0.277	0.717	0.427	1.581
速效钾 Available potassium	0.758	0.538	0.021	2.607
脲酶 Urease	0.660	-0.415	-0.403	2.311
磷酸酶 phosphatase	0.450	0.689	-0.501	1.962
过氧化氢酶 Catalase	0.591	0.716	-0.281	2.272
蔗糖酶 Invertase	0.968	0.124	0.086	3.147
特征值 Eigenvalue	10.508	2.611	1.921	
方差贡献率 Variance contribution/%	61.810	15.359	11.302	
累计方差贡献率 Cumulative contribution rate/%	61.810	77.169	88.471	

基于上述分析确定的最小数据集,运用隶属度和权重计算函数,从而确定最小数据集中每个指标的隶属度和权重系数,计算土壤质量综合评价指数,见图 1。从图 1 可以看出,不同林分土壤质量指数介于 0.267～0.792 之间,其大小排序为日本落叶松林(0.792)>蒙古栎－日本落叶松混交林(0.639)> 杉木林(0.353)> 赤松林(0.267),即 4 种林分中日本落叶松林土壤质量最高,其次为蒙古栎－日本落叶松混交林、杉木林,赤松林土壤质量最低。

表 6　土壤性质间相关性分析

Table 6　Correlation analysis of soil properties

项目 Items	SD	CP	NCP	SP	MMC	pH	SOM	TN	AN	TP	AP	TK	AK	URE	PHO	CAT	INV
SD	1.000																
CP	−0.696**	1.000															
NCP	0.104	−0.456*	1.000														
SP	−0.757**	0.869**	0.023	1.000													
MMC	−0.887**	0.853**	−0.069	0.923**	1.000												
pH	0.924**	−0.730**	0.078	−0.787**	−0.937**	1.000											
SOM	−0.909**	0.760**	−0.067	0.826**	0.944**	−0.965**	1.000										
TN	−0.920**	0.812**	−0.086	0.877**	0.965**	−0.963**	0.984**	1.000									
AN	−0.868**	0.694**	0.051	0.813**	0.942**	−0.927**	0.923**	0.929**	1.000								
TP	−0.862**	0.822**	−0.036	0.911**	0.942**	−0.911**	0.931**	0.963**	0.917**	1.000							
AP	0.163	−0.471*	0.330	−0.360	−0.312	0.238	−0.158	−0.243	−0.335	−0.342	1.000						
TK	−0.202	−0.136	0.360	0.038	0.192	−0.217	0.260	0.217	0.461*	0.238	0.009	1.000					
AK	−0.627**	0.357	0.110	0.486*	0.680**	−0.712**	0.644**	0.635**	0.809**	0.596**	−0.387	0.532**	1.000				
URE	−0.489*	0.790**	−0.166	0.809**	0.656**	−0.556**	0.536**	0.598**	0.489*	0.707**	−0.511*	−0.326	0.253	1.000			
PHO	−0.192	0.187	0.065	0.246	0.324	−0.297	0.196	0.195	0.459*	0.256	−0.720**	0.346	0.670**	0.258	1.000		
CAT	−0.356	0.242	0.050	0.308	0.464*	−0.478*	0.404	0.384	0.627**	0.408*	−0.591**	0.510*	0.847**	0.183	0.892**	1.000	
INV	−0.833**	0.740**	−0.010	0.832**	0.940**	−0.909**	0.922**	0.909**	0.969**	0.896**	−0.340	0.417*	0.776**	0.545**	0.489*	0.645**	1.000

注:* 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关;* * 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。SD:土壤密度;CP:毛管孔隙度;NCP:非毛管孔隙度;SP:总孔隙度;MMC:最大持水量;SOM:有机质;TN:全氮;AN:碱解氮;TP:全磷;AP:有效磷;TK:全钾;AK:速效钾;URE:脲酶;PHO:磷酸酶;CAT:过氧化氢酶;INV:蔗糖酶。

Note: * Indicates a significant correlation at the level of $P < 0.05$; * * indicates a significant correlation at the level of $P < 0.01$. SD: Soil density; CP: Capillary porosity; NCP: Non-capillary porosity; SP: Total porosity; MMC: Maximum moisture capacity; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; AN: Available nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Availabl phosphorus; TK: Total potassium; AK: Available potassium; URE: Urease; PHO: Phosphatase; CAT: Catalase; INV: Invertase.

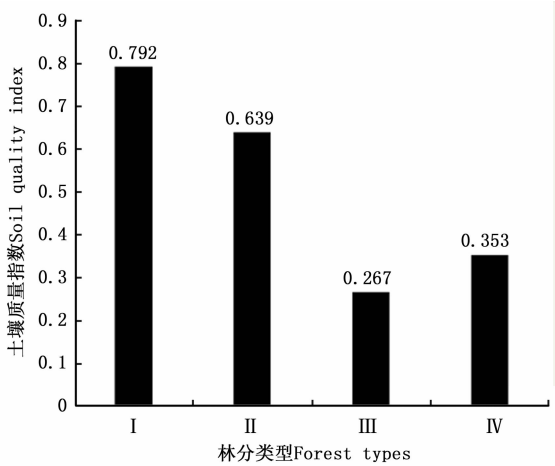

图1 不同林分土壤质量指数

Fig. 1 Comprehensive index of soil quality in different forest types

3 讨论

3.1 不同林分土壤物理性质特征

土壤密度、孔隙度及含水量与林地土壤质量状况有密切的联系,同时林木生长过程中也会导致土壤物理性质的变化。土壤密度是反映土壤紧实度的一个敏感性指标,其数值大小与土壤质地、结构、松紧和有机质含量有关[26],此外,土壤密度的大小还会影响土壤的通透性、降水的渗透率以及土壤支撑植物的性能。本研究4种林分土壤密度均表现为0～20 cm层最小,并随土层深度增加而增大,是由于林下植被与枯落物的影响,使表层土比深层土疏松。4种林分中日本落叶松纯林及混交林土壤密度较小,而杉木及赤松林土壤密度较大,是因为日本落叶松林下形成了一层厚厚的枯枝落叶层,林下植被相对也较丰富,而杉木的枯落的枝叶基本都宿存于树枝上,落在地面上较少,赤松林地里枯落的针叶也较少。土壤孔隙度是土壤中养分、水分、空气和微生物等的迁移通道、贮存库和活动场所[27],其大小和孔径的分布状况将影响土壤质量水平及植被的生长。土壤密度越大,土壤则越紧实,表现为土壤总孔隙度越小,不同林分土壤总孔隙度随土层深度的增加而显著减小($P<0.05$),原因可能和土壤中有机质、植物根系的分布及林分密度有关[28-29]。不同林分非毛管孔隙度随土层变化规律不同,可能和土壤中石砾含量、石砾大小及土层深度有关[30]。日本落叶松林0～20 cm、20～40 cm土壤最大持水量均高于其他林分,这可能与该林分所在海拔、地上植被类型、土壤表层枯落物积累以及土壤结构有关[31]。

3.2 不同林分土壤化学性质特征

4种林分土壤各层pH剖面各层均值介于4.13～5.07之间,为酸性土壤,并随土层增加酸性降低,原因可能是森林土壤的表层凋落物在分解过程中会产生有机酸,并通过降雨向矿质土层淋洗,使林地土壤呈酸性[31],也有研究表明pH值主要由土壤盐基饱和度(BSP)决定[28]。土壤有机质作为土壤肥力的重要指标之一,是植物养分和土壤微生物生命活动的能量来源[32],森林土壤有机质主要来源于植被凋落物的积累和分解,另外有机质含量受林分所在地形、物种组成等因素[28,32]的影响,从而不同土层有机质含量存在差异。不同林分土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量随土层增加而降低的趋势,充分说明土壤养分的表聚性特征,可能原因是森林土壤养分主要来源于植被凋落物的积累和分解。另外,不同土层土壤养分含量存在的差异性,与张连金[33]、魏新[34]等研究结果一致,可能与不同海拔下植被种类、林分密度、母质类型、土壤结构等因素的差异性有关。不同土层各林分全氮含量与有机质含量变化趋势基本相同,说明了土壤全氮量的分布特征与动态变化在很大程度上取决于土壤有机质含量的变化[35]。日本落叶松林和蒙古栎-日本落叶松混交林不同土层全氮、全磷含量显著高于赤松林和杉木林,这是因为前两者地处海拔较高且接近,植被密度大,土壤表层枯落物层较厚,淋溶作用弱,利于氮、磷富集[36]。除杉木林外其他林分不同土层,均表现出随土层增加有效磷含量增加的趋势,这可能与研究区域的土壤底层有机质矿化速度、林分密度以及植被根系对速效钾的吸收作用较强有关。

3.3 不同林分土壤酶活性特征

土壤酶是土壤质量的重要组成部分,参与土壤中多个重要化学过程和物质循环,是近年来森林土壤研究的的重要方向之一。研究表明土壤酶活性受不同林分种类的影响[37],影响途径主要通过根系的机械作用改变土壤的物理特性,并借助于根系分泌物、根凋落物、地上部分凋落物以及植被覆盖所导致的土壤微生境的变化等直接或间接地影响土壤微生物的活性,进而导致土壤酶活性的变化[38]。此外,不同土壤酶活性受土壤类型、生态环境条件、土壤微生物等因素的影响[39-40]。本研究中4种酶活性均与有机质、全氮、碱解氮含量显著相关,落叶松林和蒙古栎-日本落叶松混交林的有机质、全氮、碱解氮含量较赤松林和杉木林高很多,因此4种酶在落叶

松林和蒙古栎 - 日本落叶松混交林中活性也较高。除蔗糖酶外,不同林分土壤酶活性随土层深度增加而减小,杉木林不同土层 4 种土壤酶活性均有显著性差异,这可能是由于不同林分表层土壤表面凋落物较多,土壤腐殖质积累较高,为酶促反应提供了充足的基质来源。

3.4　不同林分土壤质量评价

本研究中,不同林分土壤质量评价指标之间关系紧密。土壤密度与毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、pH、有机质、全氮、碱解氮、土壤酶等其他指标之间呈极显著负相关($P<0.01$),有机质与全氮、碱解氮、全钾、速效钾、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶等指标显著正相关($P<0.05$),脲酶与全氮、全磷、有效磷等指标显著正相关,表明土壤物理、化学和生物学性质之间相互作用相互影响,不同土壤性质之间形成相互作用体系,能综合反映土壤肥力水平[41],并共同确保和维持土壤生产力及功能[42]。不同林分类型土壤质量指数表现为落叶阔叶纯林、针阔混交林得分较高,其次为落叶针叶林纯林、常绿针叶林,这与彭佳红等[43]、张继平等[41]等研究结果一致。日本落叶松林、蒙古栎 - 日本落叶松土壤质量明显高于其他两种林分,主要原因是海拔较高,气温低、湿度大,土壤表层枯落物积累较厚,有机质含量较高,其他养分多和有机质显著正相关,含量也相对较高,从而表现为土壤质量状况较好。杉木林和赤松林土壤质量相对较差,可能是由于杉木对该研究区域气候不适应,从而影响林下凋落物的分解速度,土壤微生物活动减弱,进而影响土壤质量。赤松林土壤质量最差,可能原因是该林分所在区域土层较薄,林下凋落物积累较少,导致土壤中养分含量较低,从而表现为土壤质量综合指数评分不高。建议在营造人工林或改造现存林分时,充分考虑土壤质量水平,推广日本落叶松与其他阔叶树种混交的种植模式,以改善整体的土壤质量状况,实现森林土壤资源的可持续利用。

4　结论

通过对昆嵛山自然保护区不同林分下土壤剖面各层次理化性质及土壤酶活性的研究,结果表明:不同林分土壤性质之间关系紧密,壤剖面不同层次有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量及脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性均呈现出明显的表聚性特征。不同林分对土壤剖面各层次理化性质影响显著,从而导致土壤质量的异质性,采用土壤质量指数评分法结合主成分分析得出不同林分土壤质量综合评价指数排序为:日本落叶松林(0.792) > 蒙古栎 - 日本落叶松混交林(0.639) > 杉木林(0.353) > 赤松林(0.267)。本研究通过对昆嵛山不同林分下土壤剖面各层次理化性质及土壤酶活性特征进行分析,揭示出该区域不同林分下土壤质量状况,对于昆嵛山自然保护区森林生态系统的可持续经营管理具有重要实际意义。为全面系统的了解该地区土壤肥力状况,下一步需进行对土壤质量演变方面的研究。

参考文献:

[1] 赵其国, 孙　波, 张桃林. 土壤质量与持续环境: I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997, 29(3): 113 - 120.

[2] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, *et al.* Use of soil enzymes to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3):229 - 238.

[3] 张　贞, 魏朝富, 高　明, 等. 土壤质量评价方法进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 999 - 1006.

[4] Ding M M, Yi W M, Liao L Y, *et al.* Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(24): 865 - 872.

[5] 王　芳, 黄　玫, 孙希华, 等. 大小兴安岭林区不同林型土壤养分综合评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 182 - 187.

[6] 霍小鹏, 张兴华, 李贤伟, 等. 川西米亚罗林区不同林分类型土壤养分性质研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 58 - 62,66.

[7] 王纪伟, 孙　光, 罗遵兰, 等. 汉江上游森林生态系统土壤保持服务功能研究[J]. 环境科学与技术, 2015 (12): 291 - 297.

[8] 方伟东, 亢新刚, 赵浩彦, 等. 长白山地区不同林型土壤特性及水源涵养功能[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(4): 40 - 47.

[9] Zhang C X, Zhang L M, Li S M, *et al.* Soil Conservation of National Key Ecological Function Areas[J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(6): 397 - 404.

[10] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, *et al.* Soil Quality Assessment of Acid Sulfate Paddy Soils with Different Productivities in Guangdong Province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 162(13): 177 - 186.

[11] 范少辉, 赵建诚, 苏文会, 等. 不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J]. 林业科学, 2015, 51(10): 1 - 9.

[12] 王启兰, 王　溪, 曹广民, 等. 青海省海北州典型高寒草甸土壤质量评[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6):1416 - 1422.

[13] 黄　宇, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2199 - 2205.

[14] Boluda R, Roca-Pérez L, Iranzo M, *et al.* Determination of enzymatic activities using a miniaturized system as a rapid method to assess soil quality[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(2): 286 - 294.

[15] 张学雷, 肖光平. 昆嵛山山麓土壤的发生与特性[J]. 山东师

范大学学报(自然科学版), 1993, 8(4): 14-18.
[16] 朱彦鹏, 梁 军, 孙志强, 等. 昆嵛山森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局[J]. 林业科学, 2013, 49(4): 54-61.
[17] 中华人民共和国林业局. 森林土壤分析方法(中华人民共和国林业行业标准)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 21-23.
[18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
[19] Nakajima T, Lal R, Jiang S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 146: 323-328.
[20] 陈 吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. 土壤, 2010, 42(3): 415-420.
[21] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1636-1644.
[22] 李清雪, 贾志清. 高寒沙地不同植被恢复类型土壤肥力质量差异及评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1145-1154.
[23] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]. Soil Science Society of American, Inc, M adison, Wisconsin, USA, 1994: 3221.
[24] 张凯旋, 商侃侃, 达良俊. 上海环城林带不同植物群落土壤质量综合评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 71-77.
[25] 邱莉萍, 刘 军, 王益权, 等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.
[26] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京:中国林业出版社. 2005.
[27] 王美莲, 王 飞, 姚晓娟, 等. 不同林龄兴安日本落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 925-931.
[28] 姜 林, 耿增超, 张 雯, 等. 宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1982-1993.
[29] 赵小婵, 高 楠, 李紫恬, 等. 不同林分密度对林地土壤物理性质的影响——以华北土石山区油松人工林为例[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(34): 211-214.
[30] 杜阿朋, 于澎涛, 王彦辉, 等. 六盘山北侧叠叠沟小流域土壤物理性质空间变异的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 547-554.
[31] 杨晓娟, 王海燕, 刘 玲, 等. 吉林省东部低山丘陵区4种林分类型林地的土壤肥力分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 142-148.
[32] 和丽萍, 李贵祥, 孟广涛, 等. 高黎贡山不同森林类型土壤肥力状况研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 116-121.
[33] 张连金, 赖光辉, 孙长忠, 等. 北京九龙山不同林分土壤肥力诊断与综合评[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 1-6.
[34] 魏 新, 郑小锋, 张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 9-14.
[35] 杨万勤, 张 健, 胡庭兴, 等. 森林土壤生态学[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 128-130..
[36] 何介南, 谢寄托. 莽山林区不同森林土壤氮、磷含量的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(10): 83-88.
[37] 杨 瑞, 刘 帅, 王紫泉, 等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1037-1046.
[38] Brussaard L. Biodiversity and ecosystem functioning in soil[J]. Bioscience, 1997, 26(8): 563-570.
[39] Verónica Acosta-Martínez, Leo Crusz, David Sotomayor-Rrmírez, *et al.* Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 35-45.
[40] 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1050-1060.
[41] 刘 畅, 邢兆凯, 刘红民, 等. 辽西低山丘陵区不同农林复合模式土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1049-1053.
[42] 黄 勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 2009, 39(1): 130-136.
[43] 彭佳红, 王 华, 邹冬生, 等. 亚热带区域几种典型人工林生态系统林地土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 93-99.
[44] 张继平, 张林波, 王风玉, 等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤, 2014, 46(2): 262-268.

(责任编辑:崔 贝)