

香榧林地土壤养分和重金属含量的时空变化研究

刘亚群¹, 刘荣昌², 程诗明¹, 成亮¹, 柏明娥¹, 胡单¹, 刘汝明³, 韩素芳¹

(1. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 淳安县富溪林场, 浙江 杭州 311700;

3. 柯城区林业技术推广中心, 浙江 衢州 324000)

摘要: 对香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 林地进行土壤养分、重金属的空间和时间变异分析, 有益于香榧产地土壤管理技术的科学制定。2019 年, 以浙江省香榧主产区诸暨、柯桥、嵊州、东阳和磐安 5 县(市)共 19 个香榧林地的土壤为研究对象, 对土壤养分和重金属含量进行分析。结果表明: 香榧林地的土壤有机质含量平均为 33.76 g·kg⁻¹, 94.73% 的样地处于中等以上水平; 土壤水解性 N 和有效 P 含量丰富, 处于 1 级水平的样地分别占 89.47% 和 94.73%; 土壤速效 K 含量总体水平居中, 平均为 159.52 mg·kg⁻¹, 变异系数为 57.10%; 土壤 pH 值平均为 4.75, 强酸性土壤 (<4.5) 占 36.84%; 中、微量元素均为中等变异; 土壤重金属含量除 As 和 Cd 有部分样地超标外, 其余样地的土壤重金属含量均符合《绿色食品产地环境质量标准 (NY/T391—2013)》的限值要求。将本次测定结果与 2003 年戴文圣等对同一区域 19 个样地的土壤养分和重金属含量测定结果进行对比研究。结果表明, 与 2003 年同一村级区域相比, 香榧林地的土壤理化性质得到整体提升, 土壤有效 P、有机质及速效 K 含量分列增幅的前三位, 微量元素 Mo、Fe、B 含量等均有不同程度的增加, 但土壤养分失衡问题依然存在, 仍有 5.27% 样地 K 元素处于极低水平, Ca 含量下降了 47.69%, 土壤 pH 下降了 0.78 个单位, 土壤酸化严重。基于以上研究结果, 建议香榧林地土壤管理以提升养分利用率、改善物理性质为目标, 制定“控氮减磷平衡钾”的科学配施方案, 提高生物有机肥和生物菌肥用量, 严格控制重金属施入性外源污染。

关键词: 香榧; 林地; 土壤养分; 重金属; 含量变化

中图分类号: S714.8, S664.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-3776 (2022) 04-0009-08

Temporal and Spatial Variation of Soil Nutrient and Heavy Metal Contents in *Torreya grandis* ‘Merrillii’ Stand

LIU Ya-qun¹, LIU Rong-chang², CHENG Shi-ming¹, CHENGLing¹, BAI Ming-e¹, HU Dan¹, LIU Ru-ming³, HAN Su-fang¹

(1. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 2. Chun'an Fuxi Forest Farm of Zhejiang, Hangzhou 311700, China;

3. Quzhou Kecheng Forestry Extension Center of Zhejiang, Quzhou 324000, China)

Abstract: In September and October during 2019, soil samples of 0-20 cm and 20-40 cm were collected at 19 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ stands in Zhuji, Keqiao, Shengzhou, Dongyang and Pan'an, where were the major production area of Zhejiang province. Determinations were implemented in the same year of collection on content of soil nutrients and heavy metal. The results showed that the average soil organic matter content was 33.76g/kg, meaning that 94.73% of the samples were above the medium level. The contents of hydrolyzable N and available P in the soil were rich, with 89.47% and 94.73% at level 1. The mean available K content was 159.52 mg/kg, and the variable coefficient was 57.10%. The average pH value

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 浙江省省院合作重点项目“香榧精准测土配方施肥技术研究与示范”(2018SY09)

作者简介: 刘亚群, 高级工程师, 从事林业土壤与植物研究; E-mail: liuyaun2005@aliyun.com。通信作者: 韩素芳, 副研究员, 从事经济林研究; E-mail: hansufang2004@126.com。

of the soil was 4.75, and 36.84% of the samples were strongly acidic (<4.5). Medium and trace elements showed moderate variation. According to NY/T 391-2013, the content of heavy metals among the samples was within the limit except that of As and Cd. Comparison was made on the results of 2019 and that by Dai Wen-sheng in 2003 in the same stands. It showed that soil physical and chemical properties were improved, especially content of available P, organic matter and available K. Content of Mo, Se and B increased. However K element content of 5.27% samples was at a very low level. The content of Ca decreased by 47.69%, and soil pH decreased by 0.78.

Keywords: *Torreya grandis* 'Merrillii'; stand; soil nutrient content; heavy metal; change

香榧 *Torreya grandis* 'Merrillii' 为我国特有珍稀干果树种,是近年来发展较快、经济效益较好的名特优果树之一,在我国已有 1 000 多年的栽培历史^[1-2],主产于浙江会稽山脉的诸暨、绍兴、嵊州、东阳和磐安 5 县(市)^[3-5]。浙江省诸暨市赵家镇钟家岭村及其附近村庄,是当今香榧栽培最为集中的产地,再加上周边嵊州市谷来镇、绍兴市稽东镇、诸暨市和东阳市相接的会稽山余脉东白山区以及磐安县的玉山至墨林一带,形成了目前的香榧中心产地^[6-7],其产量约占我国香榧总产量的 95%^[8]。

香榧喜深厚肥沃、土质疏松的砂壤土、壤土^[9-10]。王小明等^[11]对会稽山区香榧种群生境的调查结果表明,香榧分布区母岩类型主要为酸性凝灰岩,75.2%的分布区土壤有机质含量大于 2%,61.6%的分布区土层厚度大于 80 cm,最适宜的土壤类型为山地黄泥土和黄泥土。20 世纪 90 年代以来,随着香榧价格的大幅上升,香榧林的管理水平也得到大幅提高,施肥作为主要的管理措施被应用于香榧栽培和管理中,使得土壤的营养水平发生了很大的变化。戴文圣等^[12]对香榧主产区的诸暨、绍兴、嵊州、东阳、磐安 5 县(市)11 个乡镇的林地土壤养分进行了研究,结果表明,香榧林地土壤中的全 N、全 P、全 K 和水解性 N 的质量分数较为丰富,速效 K 相对不足,Fe、B、Mn 等营养元素丰富,且变异系数较小。近年来,随着浙江省各地香榧引种栽培面积的不断扩大,管理水平参差不齐,为追求产量,大量施用肥料特别是无机肥等问题凸显^[13-16]。董家琦^[17]等的研究结果显示,2019 年,香榧主产区诸暨、嵊州、柯桥及东阳的土壤肥力存在显著的空间差异,土壤酸化及养分失衡现象较为严重,土壤养分受人为活动影响明显;存在重金属超标风险^[18]。

为进一步摸清浙江省香榧林地土壤肥力的时空变异情况,科学合理地制定土壤养分管理和施肥决策,2019 年,本研究对浙江省香榧主产区土壤养分及重金属含量状况进行了调查分析,并与 2003 年戴文圣等^[12,19-20]的调查数据进行同区域纵向对比研究,以期对香榧产地制定精准土壤管理技术,促进林地可持续经营。

1 材料与方法

1.1 样品采集

为研究香榧主产区长期施肥等人为经营活动对土壤肥力及重金属含量的影响,2019 年 9—10 月,选择香榧主产区嵊州、诸暨、磐安、东阳、柯桥 5 县(市)7 个乡镇 19 个香榧林地进行调查取样。根据林地面积,在样地的上、中、下坡各确定 3 个采样单元(保证每 13.33 hm²至少有 1 个采样单元),采样单元内按照 S 形曲线随机确定采集点 3~5 个,按照 0~20 cm 和 >20~40 cm 土层分两层取样,每层取 1~2 kg,同一采样单元内的土壤样品按上、下两层分别合并,并依据四分法留取 1 kg 左右土壤样品。共计采集 114 个土壤样品,于实验室风干、去杂、研磨、过筛后保存备用。2020 年 1—3 月,进行土壤肥力指标测定。各样地基本情况见表 1。

表 1 样地概况
Table 1 Information of sample plots

| 序号 | 县(市、区) | 采样地点 | 地形 | 海拔/m | 土壤类型 | 香榧树龄/a |
|----|--------|------------|----|---------|------|-----------|
| 1 | 嵊州 | 谷来镇袁家岭村 | 低山 | 530 | 红壤 | 200~500 |
| 2 | | 谷来镇桃岭村 | 丘陵 | 260~370 | 红壤 | 400~500 |
| 3 | 诸暨 | 赵家镇榧王村钟家岭村 | 低山 | 520~550 | 红壤 | 100~300 |
| 4 | | 赵家镇榧王村西坑村 | 丘陵 | 330~350 | 石灰质土 | 300~1 000 |
| 5 | | 赵家镇榧王村马观音村 | 低山 | 510 | 红壤 | 300~800 |

表 1 (续)

| 序号 | 县(市、区) | 采样地点 | 地形 | 海拔/m | 土壤类型 | 香榧树龄/a |
|----|--------|-------------|----|---------|------|-----------|
| 6 | 磐安 | 安文街道墨林村 | 丘陵 | 300~415 | 红壤 | 415~700 |
| 7 | | 窈川乡依山下村 | 丘陵 | 225~346 | 红壤 | 715~1 015 |
| 8 | | 尚湖镇岭干村 | 丘陵 | 400~485 | 红壤 | 90~1 000 |
| 9 | | 尚湖镇尚路研村 | 低山 | 566~590 | 红壤 | 15~400 |
| 10 | | 安文街道东川村 | 丘陵 | 310~350 | 红壤 | 815~1 015 |
| 11 | 东阳 | 虎鹿镇西垣村 | 低山 | 418~689 | 红壤 | 20~500 |
| 12 | | 虎鹿镇溪口村 | 丘陵 | 245~326 | 红壤 | 20 |
| 13 | | 白云街道西甌山村 | 低山 | 751~813 | 红壤 | 10~18 |
| 14 | 柯桥 | 稽东镇石岙村 | 丘陵 | 195~283 | 红壤 | 35~1 000 |
| 15 | | 稽东镇陈村村 | 丘陵 | 145~210 | 石灰质土 | 20~1 000 |
| 16 | | 稽东镇石岙村塘岙自然村 | 丘陵 | 223~307 | 红壤 | 17~120 |
| 17 | | 稽东镇陈村村 | 丘陵 | 160~209 | 石灰质土 | 20~400 |
| 18 | | 稽东镇占岙村八一自然村 | 丘陵 | 234~350 | 红壤 | 130~300 |
| 19 | | 稽东镇占岙村 | 丘陵 | 212~245 | 红壤 | 200~1 500 |

1.2 土壤指标测定

1.2.1 土壤大量元素含量和 pH 值测定 土壤有机质含量测定采用总有机碳分析仪燃烧法(LY/T 1237—1999); 土壤 pH 值测定采用电位法(LY/T 1239—1999); 土壤水解性 N 含量测定采用碱解扩散法(LY/T 1228—2015); 土壤有效 P 含量测定采用盐酸-硫酸双酸浸提—钼锑抗比色法(LY/T 1232—2015); 土壤速效 K 含量测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法(LY/T 1234—2015)。

1.2.2 土壤中、微量元素含量测定 土壤 Ca、Mg 含量测定用原子吸收光谱法(NY/T 296—1995); 土壤 Zn 含量测定用原子吸收光谱法(GB/T 17138—1997); 土壤 B 含量测定用姜黄素吸光度法(全国农业技术推广服务中心土壤分析技术规范(第二版)); 土壤 Mn、Fe 含量测定用原子吸收光谱法(全国农业技术推广服务中心土壤分析技术规范(第二版)); 土壤 Mo 含量测定用电感耦合等离子质谱仪法(HJ 803—2016); 土壤 Se 含量测定用原子荧光光度法(NY/T 1104—2006)。

1.2.3 土壤重金属含量测定 土壤 Cd、Pb 含量测定用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997); 土壤 Hg 含量测定用冷原子吸收分光光度法(NY/T 1121.10—2006); 土壤 As 含量测定用共价氢化物原子荧光光度法(NY/T 1121.11—2006); 土壤 Cu 含量测定用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138—1997)。

1.3 分级标准

土壤养分分级标准参照全国第二次土壤普查养分分级标准, 见表 2; 土壤重金属含量限值按国家农业行业标准《绿色食品产地环境质量标准(NY/T391—2013)》^[21], 见表 3。

表 2 土壤养分含量分级标准
Table 2 Grading standard of soil nutrient content

| 分级标准 | 有机质/% | 水解性 N/(mg·kg ⁻¹) | 速效 K/(mg·kg ⁻¹) | 有效 P/(mg·kg ⁻¹) | pH 值 |
|-----------|----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1 级(极高) | >4.00 | >150 | >200 | >40 | ≤4.5 (强酸) |
| 2 级(高) | (3.00, 4.00] | (120, 150] | (150, 200] | (20, 40] | (4.5, 5.5] (酸性) |
| 3 级(中上) | (2.00, 3.00] | (90, 120] | (150, 150] | (10, 20] | (5.5, 6.5] (弱酸) |
| 4 级(中) | (1.00, 2.00] | (60, 90] | (50, 100] | (5, 10] | (6.5, 7.5] (中性) |
| 5 级(低) | (0.60, 1.00] | (30, 60] | (30, 50] | (3, 5] | (7.5, 8.5] (弱碱) |
| 6 级(极低) | ≤0.60 | ≤30 | ≤30 | ≤3 | (8.5, 9.0] (碱性) |

表 3 土壤重金属含量限值
Table 3 Limit of heavy metal content in soil

| 指标 | 总 As/(mg·kg ⁻¹) | 总 Cd/(mg·kg ⁻¹) | 总 Pb/(mg·kg ⁻¹) | 总 Hg/(mg·kg ⁻¹) | 总 Cu/(mg·kg ⁻¹) |
|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 质量标准 | ≤25 | ≤0.3 | ≤50 | ≤0.25 | ≤50 |

1.4 数据处理与统计分析

试验结果采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据分析, 并与同一区域戴文圣等^[12,19-20]的研究结果进行对比,

对 19 个样地的土壤样品肥力进行统计分析。将每个采样单元 0 ~ 20 cm 和 > 20 ~ 40 cm 两个剖面的土样测定数据进行平均,得到采样单元土壤养分分析数据,再将每个样地所有采样单元的数值进行平均,得到 19 个样地的土壤养分分析数据,以平均值 ± 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 香榧林地土壤养分状况

由表 4 和表 5 土壤养分分析结果表明,19 个样地的土壤有机质含量平均为 33.76 g·kg⁻¹,94.73% 以上样地的土壤有机质含量大于 2%,处于中等以上水平,其中 1 级水平的林地占 31.57%,2 级(高)水平的林地占 26.32%,说明香榧林地的土壤有机质含量丰富,且空间分布差异不大,变异系数为 26.07%;土壤水解 N 含量平均为 223.54 mg·kg⁻¹,均处于 2 级及以上水平,其中 1 级水平的林地占 89.47%,2 级水平的林地占 10.53%,说明香榧林地的土壤水解 N 含量总体处于极高水平,且空间分布差异不大,变异系数为 30.17%;土壤有效 P 含量为 28.01 ~ 440.92 mg·kg⁻¹,平均为 241.83 mg·kg⁻¹,除磐安县安文街道东川村 10 号样地的土壤有效 P 含量处于 2 级水平外,其余 94.73% 的林地土壤有效 P 含量均处于 1 级水平,说明香榧林地的土壤有效 P 含量水平极高,空间分布差异也不大,变异系数为 30.17%;土壤速效 K 含量平均为 159.52 mg·kg⁻¹,处于中等以上水平的林地占 78.94%,其中,1 级水平的林地占 42.11%,2 级水平的林地占 15.79%,3 级水平的林地占 21.04%,处于极低水平的林地占 5.27%,相较于土壤水解 N 和土壤有效 P 含量,香榧林地的土壤速效 K 含量总体水平居中,且分布不均匀,变异系数达 57.10%;土壤 pH 值的变幅为 4.23 ~ 5.60,平均为 4.75,大部分林地的土壤呈酸性和强酸性,其中,酸性土壤(4.5 ~ 5.5)占 52.63%,强酸性土壤(<4.5)占 36.84%,弱酸性土壤(5.5 ~ 6.5)仅占 10.53%,说明香榧林地的土壤 pH 值总体偏低,土壤有酸化趋势。

表 4 香榧林地土壤养分状况
Table 4 Soil nutrient content of *T. grandis* 'Merrillii' stand

| 序号 | 有机质/(g·kg ⁻¹) | 水解 N/(mg·kg ⁻¹) | 有效 P/(mg·kg ⁻¹) | 速效 K/(mg·kg ⁻¹) | pH |
|-----|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 | 29.81±5.39 | 218.07±20.76 | 197.88±59.94 | 313.98±67.17 | 4.85±0.25 |
| 2 | 41.88±7.53 | 241.41±32.91 | 156.61±40.85 | 230.17±63.76 | 4.47±0.34 |
| 3 | 49.31±3.52 | 295.54±35.12 | 202.54±30.21 | 368.60±130.31 | 4.94±0.56 |
| 4 | 26.11±1.64 | 151.38±7.16 | 175.17±40.37 | 223.11±28.76 | 5.60±0.95 |
| 5 | 40.01±3.13 | 228.83±11.16 | 180.26±47.17 | 257.08±41.79 | 4.62±0.17 |
| 6 | 26.32±1.27 | 159.74±47.08 | 209.61±56.90 | 73.94±45.97 | 4.25±0.25 |
| 7 | 27.96±7.83 | 160.63±41.68 | 128.43±20.07 | 86.03±26.06 | 5.17±0.46 |
| 8 | 24.22±3.75 | 182.31±18.04 | 273.49±157.08 | 164.51±24.67 | 4.50±0.01 |
| 9 | 27.93±3.17 | 192.48±34.47 | 204.33±76.78 | 96.77±35.55 | 4.23±0.29 |
| 10 | 41.41±8.50 | 282.79±39.26 | 28.01±3.26 | 104.25±41.72 | 5.35±0.56 |
| 11 | 44.41±13.16 | 163.03±21.40 | 378.62±6.89 | 76.43±57.17 | 4.76±0.05 |
| 12 | 15.71±8.93 | 123.50±63.19 | 206.56±94.61 | 22.56±16.69 | 4.44±0.12 |
| 13 | 39.19±9.22 | 182.69±32.36 | 440.92±83.64 | 44.96±9.53 | 4.92±0.09 |
| 14 | 34.44±4.92 | 300.16±52.97 | 322.79±2.42 | 179.39±19.60 | 4.23±0.11 |
| 15 | 42.18±12.14 | 284.70±108.17 | 328.69±76.71 | 141.28±59.33 | 4.41±0.22 |
| 16 | 23.21±0.17 | 311.23±49.61 | 200.99±46.43 | 172.44±33.23 | 5.19±0.81 |
| 17 | 35.92±8.45 | 145.91±31.20 | 299.03±28.89 | 116.44±52.49 | 4.54±0.29 |
| 18 | 31.47±6.43 | 348.70±28.35 | 331.02±41.60 | 203.28±4.81 | 4.33±0.21 |
| 19 | 39.91±8.56 | 274.10±74.50 | 329.84±60.07 | 155.57±40.16 | 5.54±0.45 |
| 平均值 | 33.76 | 223.54 | 241.83 | 159.52 | 4.75 |

表 5 香榧林地土壤养分等级
Table 5 Soil nutrient grade of *T. grandis* 'Merrillii' stand

| 指标 | 变幅/(g·kg ⁻¹) | 变异系数/% | 分布频率/% | | | | | |
|-------|--------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-----|------|
| | | | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 4 级 | 5 级 | 6 级 |
| 有机质 | 15.71 ~ 49.31 | 26.07 | 31.57 | 26.32 | 36.84 | 5.27 | — | — |
| 水解性 N | 0.12 ~ 0.35 | 30.17 | 89.47 | 10.53 | — | — | — | — |
| 有效 P | 0.03 ~ 0.44 | 40.81 | 94.73 | 5.27 | — | — | — | — |
| 速效 K | 0.02 ~ 0.37 | 57.10 | 42.11 | 15.79 | 21.04 | 15.79 | — | 5.27 |
| pH | 4.23 ~ 5.60 | 9.26 | 36.84 | 52.63 | 10.53 | — | — | — |

2.2 香榧林地土壤中、微量元素含量状况

香榧林地土壤中、微量元素的含量及分布等级分析表明(表6),土壤中量元素Ca含量的变幅为0.33~3.65 g·kg⁻¹,平均为1.36 g·kg⁻¹;土壤中量元素Mg含量平均为3.54 g·kg⁻¹,变幅为1.66~5.67 g·kg⁻¹,各样地间Ca、Mg含量差异较大,分布不均匀,其变异系数分别为66.64%和29.16%。土壤微量元素变异系数最大的为Se,其变异系数高达92.30%,含量平均为1.14 mg·kg⁻¹;其次是B,含量平均为168.89 mg·kg⁻¹,其变异系数为66.89%。变异系数最小的为Mo,其变异系数仅为21.22%。

表6 香榧林地土壤中、微量元素含量
Table 6 Medium and trace element contents in soil of *T. grandis* 'Merrillii' stand

| 序号 | Ca/(g·kg ⁻¹) | Mg/(g·kg ⁻¹) | B/(mg·kg ⁻¹) | Zn/(mg·kg ⁻¹) | Mn/(mg·kg ⁻¹) | Mo/(mg·kg ⁻¹) | Fe/(mg·kg ⁻¹) | Se/(mg·kg ⁻¹) |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.54±0.22 | 5.67±0.73 | 54.92±6.53 | 123.08±11.7 | 614.71±76.63 | 0.72±0.27 | 54.20±0.82 | 1.03±0.58 |
| 2 | 0.33±0.29 | 3.90±0.46 | 45.02±10.86 | 90.91±6.22 | 389.69±96.16 | 0.67±0.19 | 45.97±11.08 | 1.69±0.79 |
| 3 | 0.90±1.01 | 3.13±1.37 | 37.50±9.45 | 109.23±32.2 | 533.16±111.39 | 0.87±0.25 | 38.26±10.89 | 2.31±0.42 |
| 4 | 1.70±1.51 | 3.00±1.08 | 144.69±191.34 | 88.96±5.41 | 432.95±181.46 | 0.85±0.43 | 26.14±10.78 | 1.08±0.90 |
| 5 | 0.65±0.48 | 1.66±0.10 | 25.28±3.23 | 70.26±21.22 | 289.38±93.49 | 0.82±0.38 | 18.62±3.68 | 3.89±1.07 |
| 6 | 0.65±0.59 | 2.32±1.33 | 45.12±40.33 | 62.08±3.27 | 432.87±186.14 | 1.18±0.31 | 21.08±1.21 | 1.86±1.17 |
| 7 | 1.45±1.00 | 2.60±0.52 | 72.10±79.16 | 75.69±4.78 | 593.10±207.17 | 0.67±0.34 | 27.04±3.18 | 1.18±0.65 |
| 8 | 2.51±1.55 | 4.90±1.00 | 132.77±148.3 | 93.13±15.13 | 724.01±193.86 | 0.38±0.23 | 46.20±6.22 | 0.87±0.50 |
| 9 | 0.40±0.29 | 2.63±1.06 | 103.67±140.58 | 60.47±5.17 | 390.23±186.37 | 0.78±0.06 | 24.52±5.79 | 2.04±1.51 |
| 10 | 3.65±3.23 | 2.86±0.34 | 31.32±3.13 | 82.57±8.15 | 529.96±112.19 | 0.57±0.54 | 33.33±5.42 | 2.85±0.60 |
| 11 | 2.76±1.63 | 3.84±0.15 | 287.00±6.95 | 78.05±22.60 | 662.00±299.06 | 0.60±0.03 | 28.43±2.28 | 0.12±0.01 |
| 12 | 0.65±0.16 | 2.87±0.72 | 297.50±9.34 | 47.10±18.13 | 509.00±367.94 | 0.76±0.54 | 24.90±9.24 | 0.08±0.02 |
| 13 | 1.24±0.78 | 3.85±1.02 | 319.83±13.84 | 114.50±5.77 | 700.50±244.14 | 0.76±0.11 | 54.75±8.57 | 0.14±0.06 |
| 14 | 0.84±0.29 | 3.11±0.35 | 262.46±6.46 | 54.06±6.53 | 403.42±137.86 | 0.68±0.03 | 24.71±1.32 | 0.37±0.03 |
| 15 | 1.41±0.95 | 3.48±0.33 | 257.09±2.43 | 56.06±1.40 | 441.57±183.36 | 0.67±0.02 | 26.59±3.78 | 0.38±0.03 |
| 16 | 0.56±0.15 | 3.61±0.20 | 267.93±3.32 | 56.39±2.13 | 467.51±116.60 | 0.70±0.03 | 31.73±0.53 | 0.36±0.01 |
| 17 | 2.06±0.64 | 4.89±1.32 | 287.52±14.36 | 67.24±7.69 | 804.84±144.42 | 0.71±0.08 | 30.90±8.34 | 0.48±0.10 |
| 18 | 1.68±1.04 | 5.03±1.88 | 278.20±15.38 | 65.86±8.15 | 788.93±277.94 | 0.66±0.03 | 34.01±10.25 | 0.43±0.12 |
| 19 | 1.80±1.04 | 3.94±0.19 | 259.01±3.23 | 72.16±7.76 | 765.80±129.53 | 0.76±0.06 | 29.83±1.56 | 0.50±0.04 |
| 平均值 | 1.36 | 3.54 | 168.89 | 77.25 | 551.24 | 0.73 | 32.70 | 1.14 |
| 变幅 | 0.33~3.65 | 1.66~5.67 | 25.28~319.83 | 47.10~123.08 | 289.38~804.84 | 0.38~1.18 | 18.62~54.75 | 0.08~3.89 |
| 变异系数/% | 6.64 | 29.16 | 66.89 | 27.74 | 28.01 | 21.22 | 32.30 | 92.30 |

2.3 香榧林地土壤重金属含量状况

表7 香榧林地土壤重金属含量
Table 7 Heavy metal content in soil of *T. grandis* 'Merrillii' stand

| 序号 | As/(mg·kg ⁻¹) | Cd/(mg·kg ⁻¹) | Pb/(mg·kg ⁻¹) | Hg/(mg·kg ⁻¹) | Cu/(mg·kg ⁻¹) |
|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 7.06±5.40 | 0.34±0.06 | 18.52±6.13 | 0.03±0.01 | 20.89±5.42 |
| 2 | 3.85±1.76 | 0.26±0.06 | 23.60±6.56 | 0.11±0.07 | 19.05±3.69 |
| 3 | 6.27±3.85 | 0.50±0.21 | 29.56±2.50 | 0.06±0.03 | 17.91±8.19 |
| 4 | 13.61±9.89 | 0.27±0.12 | 42.84±22.23 | 0.07±0.06 | 15.47±4.17 |
| 5 | 5.20±2.56 | 0.37±0.20 | 27.99±8.50 | 0.03±0.01 | 11.10±2.60 |
| 6 | 6.67±4.43 | 0.14±0.05 | 27.57±3.38 | 0.06±0.07 | 6.27±1.42 |
| 7 | 6.27±8.24 | 0.30±0.04 | 30.60±9.31 | 0.08±0.08 | 6.34±0.36 |
| 8 | 11.09±12.18 | 0.20±0.09 | 23.83±8.10 | 0.04±0.04 | 10.35±0.62 |
| 9 | 6.56±8.17 | 0.16±0.06 | 27.15±7.88 | 0.04±0.04 | 9.56±3.05 |
| 10 | 2.39±0.46 | 0.37±0.13 | 21.94±3.66 | 0.03±0.02 | 6.59±4.17 |
| 11 | 15.74±0.79 | 0.17±0.11 | 41.77±11.25 | 0.09±0.02 | 16.59±16.34 |
| 12 | 14.07±12.02 | 0.04±0.00 | 38.37±4.84 | 0.06±0.00 | 6.50±0.97 |
| 13 | 26.68±5.69 | 0.11±0.03 | 40.37±9.69 | 0.13±0.04 | 9.85±4.94 |
| 14 | 19.43±0.38 | 0.09±0.01 | 33.35±4.51 | 0.09±0.01 | 7.85±0.49 |
| 15 | 10.12±4.32 | 0.09±0.00 | 32.77±2.32 | 0.09±0.00 | 7.32±1.19 |
| 16 | 18.08±1.97 | 0.09±0.01 | 34.96±3.96 | 0.09±0.01 | 5.68±0.49 |
| 17 | 19.57±5.44 | 0.12±0.02 | 35.15±1.95 | 0.11±0.02 | 8.48±1.52 |
| 18 | 15.59±5.24 | 0.11±0.02 | 32.50±4.01 | 0.11±0.02 | 6.85±1.14 |
| 19 | 19.99±0.97 | 0.12±0.02 | 38.74±1.50 | 0.12±0.02 | 7.96±2.57 |
| 平均 | 12.01 | 0.20 | 31.66 | 0.08 | 10.56 |
| 标准差 | 6.75 | 0.12 | 6.97 | 0.03 | 4.89 |
| 变异系数/% | 56.18 | 61.08 | 22.03 | 41.35 | 46.31 |
| 含量等级 | ≤25 | ≤0.3 | ≤50 | ≤0.2 | ≤50 |

由表7可以看出,香榧林地中土壤重金属As平均含量为12.01 mg·kg⁻¹,除13号样地的平均含量为26.68 mg·kg⁻¹,

超出 NY/T391—2013 限值 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,在其余样地土壤中的含量均未超标。重金属 Cd 含量平均为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 1、3、5、10 号样地的 Cd 含量超出限值。重金属 Pb、Hg 和 Cu 含量的平均值分别为 $31.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 所有样地土壤中的含量均在限值范围内,且变异系数均在 50% 以下,相对于 As、Cd 其空间分布差异不大。以上分析表明,香榧林地中土壤重金属含量除个别样品超标外,大部分样品的含量符合 NY/T391—2013。

2.4 香榧林地土壤养分和重金属含量变化

将本次测定结果与 2003 年戴文圣等^[12,19-20]对同一区域 19 个样地的土壤养分和重金属含量测定结果进行对比,结果见表 8。由表 8 中可看出,2003 年和 2019 年,土壤有机质平均含量分别为 $14.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $33.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,增加了 $19.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,提高了 132.35%;土壤水解性 N 含量 2019 年比 2003 年增加 $32.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,提高了 16.73%;土壤有效 P 含量 2019 年比 2003 年增加 $165.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,提高了 215.95%;土壤速效 K 含量比 2003 年增加 $57.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,提高了 56.07%;而土壤 pH 2019 年比 2003 年下降 0.78,下降了 14.10%,土壤酸性增强。

表 8 2003 年与 2019 年香榧林地土壤养分和重金属含量变化
Table 8 Comparison on soil nutrient and heavy metal content in *T. grandis* 'Merrillii' stand in 2003 and 2019

| 项目 | 年份/年 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 变异系数 | 变幅 | 变化率/% |
|--|------|--------|----------|--------|--------|---------|--------|
| 有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 14.53 | 29.70 | 4.90 | 50.80 | 19.23 | 132.35 |
| | 2019 | 33.76 | 49.31 | 15.71 | 26.07 | | |
| 水解性 N/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 191.50 | 490.00 | 105.00 | 47.50 | 32.04 | 16.73 |
| | 2019 | 223.54 | 348.70 | 123.50 | 30.17 | | |
| 有效 P/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 76.54 | 418.60 | 2.70 | 131.76 | 165.29 | 215.95 |
| | 2019 | 241.83 | 440.92 | 28.01 | 40.81 | | |
| 速效 K/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 102.21 | 243.50 | 36.25 | 49.38 | 57.31 | 56.07 |
| | 2019 | 159.52 | 368.60 | 22.56 | 57.10 | | |
| pH | 2003 | 5.53 | 6.80 | 4.50 | 12.00 | -0.78 | -14.10 |
| | 2019 | 4.75 | 5.60 | 4.23 | 9.26 | | |
| Ca/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 2.60 | 5.90 | 1.30 | 44.59 | -1.24 | -47.69 |
| | 2019 | 1.36 | 3.65 | 0.33 | 66.64 | | |
| Mg/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 3.70 | 6.10 | 2.40 | 30.37 | -0.16 | -4.32 |
| | 2019 | 3.54 | 5.67 | 1.66 | 29.16 | | |
| B/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 144.47 | 250.50 | 73.41 | 40.78 | 24.42 | 16.90 |
| | 2019 | 168.89 | 319.83 | 25.28 | 66.89 | | |
| Zn/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 100.08 | 181.59 | 65.04 | 30.03 | -22.83 | -22.81 |
| | 2019 | 77.25 | 123.08 | 47.10 | 27.74 | | |
| Mn/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 855.54 | 1 785.30 | 207.76 | 48.32 | -304.30 | -35.57 |
| | 2019 | 551.24 | 804.84 | 289.38 | 28.01 | | |
| Mo/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 0.13 | 2.55 | 0 | 26.72 | 0.60 | 461.54 |
| | 2019 | 0.73 | 1.18 | 0.38 | 21.22 | | |
| Fe/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 17.20 | 22.40 | 13.80 | 23.12 | 15.50 | 90.12 |
| | 2019 | 32.70 | 54.75 | 18.62 | 32.30 | | |
| Se/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 0 | - | - | - | 1.14 | - |
| | 2019 | 1.14 | 3.89 | 0.08 | 920.30 | | |
| 总 As/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 24.22 | 233.10 | 2.57 | 214.17 | -12.21 | -50.41 |
| | 2019 | 12.01 | 26.68 | 2.39 | 56.18 | | |
| 总 Cd/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 0 | - | - | - | 0.20 | - |
| | 2019 | 0.20 | 0.50 | 0.04 | 61.08 | | |
| 总 Pb/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 49.76 | 70.01 | 34.30 | 18.86 | -18.10 | -36.37 |
| | 2019 | 31.66 | 42.84 | 18.52 | 22.03 | | |
| 总 Hg/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 0 | - | - | - | 0.08 | - |
| | 2019 | 0.08 | 0.13 | 0.03 | 41.35 | | |
| 总 Cu/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 2003 | 11.18 | 70.08 | 0 | 137.18 | -0.62 | -5.55 |
| | 2019 | 10.56 | 20.89 | 5.68 | 46.31 | | |

中、微量元素的含量变化情况为:Ca、Mg、Zn、Mn 含量 2019 年比 2003 年均不同程度地减少,下降最多和最少的分别为 Ca、Mg(分别下降 47.69%、4.32%),微量元素 Mo、Fe、B 含量等均有不同程度地增加,其中 Mo 和 Fe 含量增加较大,分别增加 $0.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (增加 461.54%) 和 $15.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (增加 90.12%)。

从土壤重金属含量变化来看,除 Cd 和 Hg 含量 2019 年比 2003 年稍有增加外,其余指标均有不同程度的下降,其中 As 和 Pb 含量 2019 年比 2003 年分别下降了 $12.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (下降 50.41%) 和 $18.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (下降 36.37%), Cu 含量下降了 $0.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (下降 5.55%)。

3 讨论与结论

3.1 讨论

自浙江省实施“香榧南扩”战略以来,截至 2019 年,全省香榧种植面积达 4.8 万 hm^2 ,与主产区立地条件的差异对新发展香榧林地施肥等生产管理提出了更高的要求^[22]。笔者于 2018—2020 年对全省香榧种植面积逾 333 hm^2 共计 20 个县(市、区)的香榧林地土壤肥力进行了肥力测定。目前,对浙江省香榧土壤肥力的评价研究较少,没有相应的等级划分标准,亟需根据全省特别是主产区香榧土壤肥力情况制定科学的划分标准。戴文圣等^[12]采用南方红黄壤养分分级标准和农业农村部有关绿色食品产地土壤养分分级标准对诸暨、绍兴、嵊州、东阳和磐安 5 县(市)的香榧林地土壤肥力(2003 年)进行了评价,香榧林地土壤中 N、P、K 比例失调,表现为多数土壤 N 过量,少数土壤 P 过量或不足,多数土壤 K 缺乏,并提出“控氮稳磷增钾”的施肥方案。

近年来,随着香榧价格的不断提高,香榧林地的经营管理水平也大幅提高,科研人员在提高土壤肥力及改善林地土壤理化性质等方面开展了一系列的研究工作^[23-29],为香榧的高产优质栽培提供了较好的理论基础和实践经验。本研究采用全国第二次土壤普查标准进行土壤肥力评价,与 2003 年同一村级区域相比,香榧林地土壤有效 P、有机质及速效 K 含量分列大量养分增幅的前三,Mo、B、Se 等微量元素总量增幅较大,说明通过“控氮稳磷增钾”以及增施微量元素等经营理念的加强,香榧林地的土壤理化性质得到整体提升,但土壤养分失衡问题仍然存在,速效 K 含量仍有 5.27% 样地处于极低水平。与 2003 年相比,土壤 pH 下降了 0.78,土壤酸化严重,交换性盐基阳离子随降雨淋失,其中,以中、微量元素中的 Ca 含量降幅最大(47.69%),施肥种类、配比、数量及方式的不合理是不可忽视的原因之一^[17]。同时,随土壤 pH 下降,土壤重金属活性增加,As 和 Cd 含量存在超标的潜在风险,与王敏等^[18]的香榧主产区土壤 Cd 重金属潜在风险最大,整体处于轻微生态危害研究结论相符。因此,强化生态化经营,制定精准土壤管理方案仍是目前香榧提升产量、保证品质和质量安全的重要技术措施。

3.2 结论

除速效 K (含量极低,为 5.27%),香榧主产区土壤大量元素的含量均处于中等以上水平;中、微量元素处于不同程度的中等变异;少量土壤存在重金属 As、Cd 超标风险。与 2003 年同一区域相比,土壤有效 P 和有机质含量增幅较大,土壤酸化严重, Ca 含量降幅较大,建议香榧主产区林地土壤管理以提升现有养分利用率、改善物理性质为目标,制定“控氮减磷平衡钾”的科学配施方案,增加生物有机肥和生物菌肥用量;严格控制重金属施入性外源污染。新发展香榧林宜根据土壤肥力测定结果,参照主产区管理经验制定科学施肥方案。

参考文献:

- [1] 黎章矩,程晓建,戴文圣,等. 香榧品种起源考证[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(4): 443-448.
- [2] 陈力耕,王辉,童品璋. 香榧的主要品种及其开发价值[J]. 中国南方果树, 2005, 34(5): 33-34.
- [3] 程晓建,黎章矩,戴文圣,等. 香榧的生态习性及其适生条件[J]. 林业科技开发, 2009, 23(1): 39-42.
- [4] 黎章矩,程晓建,戴文圣,等. 浙江香榧生产历史、现状与发展[J]. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 471-473.
- [5] 叶春球,陈高杰,修珍珍,等. 会稽山古香榧群农业文化遗产价值分析[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(6): 75-78.
- [6] 童品璋. 诸暨香榧的现状、问题与对策经济林研究[J]. 2003, 21(4): 148-150.
- [7] 陈红星,陈华,张龙满,等. 浙江省磐安县香榧种质资源调查[J]. 林业科学研究, 2004, 17(5): 660-665.
- [8] 黄晓慧. 香榧浙江林农的致富果[J]. 绿色中国, 2011(20): 114-115.
- [9] 任钦良. 香榧生物学特性的研究[J]. 经济林研究, 1989, 7(2): 56-60.
- [10] 王小明,王珂,秦遂初,等. 香榧适生环境研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(3): 382-386.

