

# 田头山自然保护区林地土壤理化性质与重金属相关性研究\*

Correlation between Physicochemical Properties and Heavy Metals in Forest Soils of Tiantou Mountain Nature Reserve

窦苗 陶玉柱\* 高瑶瑶

DOU Miao, TAO Yu-zhu\*, GAO Yao-yao

**摘要:** 为揭示土壤理化性质和土壤重金属的相关性, 采用对角线法和环刀法对深圳市田头山自然保护区3个典型常绿阔叶次生林样地进行土壤采集, 并测定其主要理化性质和重金属含量。研究发现, 0~20 cm 剖面层容重最小, 土壤有机质、全氮、碱解氮整体随土层深度增加而减小; 理化性质与重金属间存在显著或极显著相关性。结果表明, 与土壤物理性质相比, 化学性质与重金属相关性密切, 通过冗余分析得出全磷、全氮、全钾、碱解氮、pH、有机质等是影响重金属含量的主要因子, 通径分析进一步确定土壤理化性质对重金属活性的直接和间接效应。

**关键词:** 土壤; 理化性质; 重金属; 相关性

**中图分类号:** S688

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2641 (2022) 01-0016-06

**收稿日期:** 2021-06-09

**修回日期:** 2021-10-12

**Abstract:** In order to reveal the correlation between soil Physicochemical properties and soil heavy metals, the diagonal method and circular knife method were used to collect and determine the main physicochemical properties and heavy metal contents in three typical evergreen broad-leaved secondary forest sample plots in Tiantou Mountain Nature Reserve, Shenzhen. It was found that the soil bulk density of the 0~20 cm profile layer was the smallest, and the overall soil organic matter, total nitrogen and alkaline decomposition nitrogen decreased with increasing soil depth. At the same time, there was a significant or highly significant correlation between physicochemical properties and heavy metals. The results showed that chemical properties were closely correlated with heavy metals compared to soil physical properties. Redundancy analysis led to the conclusion that total phosphorus, total nitrogen, total potassium, alkaline soluble nitrogen, pH and organic matter were the main factors affecting heavy metal content. Passage path analysis further determined the direct and indirect effects of soil physicochemical properties on heavy metal activity.

**Key words:** Soil; Physicochemical properties; Heavy metal; Correlation

森林土壤是林木生长发育的基础, 为植被提供除光能以外所需的水、气、热、肥等养分, 其肥力和质量反映了土壤为植物生长提供养分和水分的能力<sup>[1]</sup>。森林与人类活动密切相关, 森林土壤中累积的重金属通过树木吸收和空气循环对人类造成潜在威胁。目前, 关于森林土壤理化性质的研究主要为不同海拔梯度对土壤理化性质的影响<sup>[2]</sup>, 土壤酶、微生物与森林土壤关系的研究<sup>[3-4]</sup>, 森林土壤理化性质与水源涵养的相关性研究<sup>[5]</sup>等方面, 土壤理化性质与重金属相关性的研究鲜少报道。深圳田头山市级自然保护区位于深圳东部, 是深圳市生物多样性最为丰富的区域之一。对田头山自然保护区内常绿阔叶次生林的土壤理化性质及重金属含量进行测定分析, 可以进一步加深对保护区内林木生长发育状况的了解, 为深圳市森林资源利用和管理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

深圳田头山市级自然保护区(114°18'~114°27'E, 22°38'~22°43'N)位于深圳东部坪山新区坪山街道, 东北邻惠州市, 东南接葵涌街道办事处, 与马峦山郊野公园和大鹏半岛自然保护区相邻, 距深圳市中心32 km。保护区的规划面积为20.0 km<sup>2</sup>, 包括田头山及周边山体。其属于亚热带海洋性季风气候, 年均气温22.4℃, 极端高温36.6℃, 极端低温1.4℃; 年均相对湿度80%, 年均降雨量1933 mm, 年平均降雨日140 d; 无霜期较长, 为335 d; 常年主导风向为东南风, 气候温和, 夏季较长, 冬季温暖。地形以低山为主, 母岩层为花岗岩, 土壤多为红壤和赤红壤, 基本呈现酸性。保护区的生物资源丰富, 以热带和亚热带植被为主, 代表植被类型为南亚热带常绿阔叶林, 拥有国家珍稀濒危植物44种, 其中包括广东木瓜红 *Rehderodendron kwangtungense*、镰羽瘤足蕨 *Plagiogyria falcata*、栎叶柯 *Lithocarpus quercifolius*、白桂木 *Artocarpus hypargyreus* 等<sup>[6]</sup>。

\* 基金项目: 省级生态公益林效益补偿资金省统筹项目“珠三角城市森林生态效益监测与评估”(2020STC); 广东省林业科技创新平台项目“林业生态监测网络平台建设”(2021-KYXM-09, 2021-KYXM-09); 深圳市野生动物救护中心项目“市级自然保护区生态监测”; 深圳市规划和自然资源局项目“深圳市国家森林城市建设生态工程成效评估技术”

## 1.2 样地设置与样品采集

2020年6月对深圳田头山自然保护区常绿次生林进行全面勘查,在此基础上选择代表性区域,设置3个20 m×20 m的样地,开展常绿阔叶林土壤理化性质与重金属的相关性研究。每块样地分别采用对角线法选取5个样点挖掘剖面,每个剖面设5个土层深度,分别为0~20 cm(A层)、20~40 cm(B层)、40~60 cm(C层)、60~80 cm(D层)、80~100 cm(E层),仅在每层剖面的中部取样,以此克服层次间的过渡现象<sup>①</sup>。同一样地采集的土壤混合样品约500 g,去除杂物和细根,用对角二分法去除多余土壤,装入密封袋并做好标记,用于土壤化学性质的分析。

3个样地均根据上述剖面的5个土层深度用100 m<sup>3</sup>环刀进行采样,每层设置3个重复,做好标记用于土壤物理性质的测定。

## 1.3 指标测定方法

按照林业行业标准《森林生态系统长期定位观测方法》(LY/T 1952-2011)测定森林土壤理化性质(表1)。

## 1.4 数据处理与分析

运用SPSS 17.0软件进行均值分析和相关性分析,Canoco 5软件进行RDA分析,Ri386 4.1.0进行通径分析,Excel软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同样地土壤理化性质分析

#### 2.1.1 土壤物理性质变化特征

##### 1) 土壤容重

A层深度的土壤容重最小,为1.14 g·cm<sup>-3</sup>,D层的最大,为1.35 g·cm<sup>-3</sup>,不同土层深度的土壤容重由大至小的排序为D层、E层、B层、C层、A层。其中,A层深度的土壤容重与其余土层的均存在显著差异,其他土层间的土壤容重差异不显著(图1)。

##### 2) 土壤持水量

在最大持水量方面,A层土壤的值最大,为136.88 mm,其余土层的数值保持在120 mm上下,变化幅度较小。A层土壤最大持水量与其余土层间均存在显著差异;除A层外的其他土层间无显著差异。

土壤毛管持水量和最小持水量同在A层达到最大值,分别为108.30 mm、103.88 mm,E层最小,分别为88.46 mm、82.66 mm。两方面数据均是A层与D、E层存在显著差异,其余土层间差异均不显著(图2)。

##### 3) 土壤孔隙度

各土层的土壤毛管孔隙度排序为A层>C层>B层>D层>E层,A层和D、E层存在显著差异性。各土层的土壤

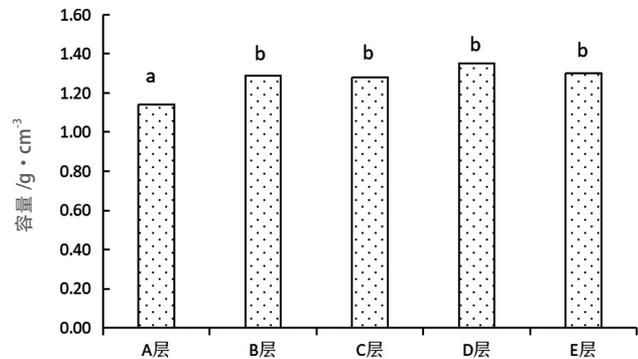
总孔隙度排序为A层>C层>B层>E层>D层,A层达54.75%,且A层与其余土层均存在显著差异性(图3)。

##### 4) 土壤通气性

A层土壤通气性值最大,为21.10,C层最小,为14.05,A层与B、C、D层均有显著相关性。结果表明随着土层深度增加,土壤通气性呈现先减小后增大的趋势(图4)。

表1 主要土壤理化性质指标分析方法

序号	指标	分析方法
1	土壤容重、孔隙度	环刀法
2	自然含水量	烘干法
3	pH值	电位法
4	土壤有机质	重铬酸钾氧化外加热法
5	全氮	半微量凯氏定氮法
6	全磷	氢氧化钠碱熔钼锑抗比色法
7	全钾	氢氧化钠碱熔火焰光度计法
8	水解性氮	碱解扩散法
9	有效磷	双酸浸提钼锑抗比色法
10	速效钾	乙酸铵浸提火焰光度计法
11	全量铜、锌、镍、铬、镉、铅	氢氟酸-高氯酸-硝酸消解法、原子吸收分光光度计法
12	全砷	氢化物发生原子吸收光谱法
13	全汞	冷原子吸收分光光度计法



注:不同字母代表不同土层在P<0.05水平上的差异显著,图2~11同

图1 不同土层深度的土壤容重

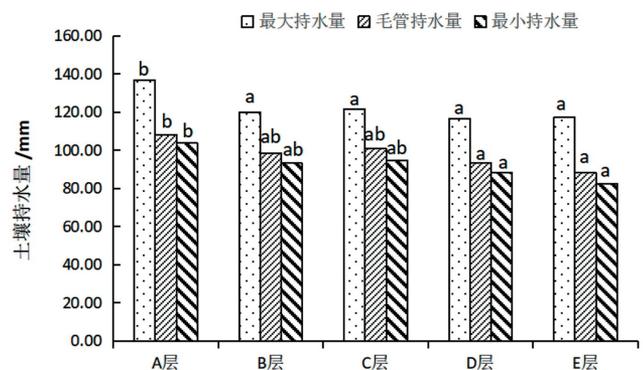


图2 不同土层深度的土壤持水量

① 根据林业行业标准《森林土壤样品的采集与制备》(LY/T 1210-1999),为保证剖面土壤样品的典型性和代表性,一般只在各发生层的中部采集样品。

5) 小结

综上所述,可分析得出:随着植物的生长,枯落物分解、释放进入土壤,能够改善土壤理化性质,使得表层土壤密度减少、孔隙度增加,持水能力增强。这与张凯旋等<sup>[7]</sup>的研究结果基本一致。

2.1.2 土壤化学性质变化特征

1) pH 值

各土层间 pH 值无显著差异,且维持较稳定的水平(图 5)。

2) 有机质、全量氮磷钾

在有机质方面,A 层含量最大,为 33.39 g/kg, D 层最小,为 12.59 g/kg;除土壤 C 层与 E 层间无显著差异外,其余 3 个土层间均存在显著或极显著差异(P<0.01)。

在全钾含量方面,各土层均无显著差异(图 6)。在全氮含量方面,各土层的含量排序为 A 层>B 层>C 层=D 层=E 层。A 层含量为 1.56 g/kg,其余与 B 层无显著差异外,与其余各土层间均存在显著差异。在全磷含量方面,各土层的排序为 A 层>B 层=C 层=D 层>E 层,且各土层的全磷含量无显著差异(图 7)。

综上所述,有机质、全氮、全磷含量均在表层土壤中最高,且随土层深度增加基本表现为减少的趋势。究其原因,可能是枯落物等腐殖质均在表层土壤分解,除被植物吸收利用外,便直接进入土壤表层,而下层的有机质等主要是从上层土壤淋溶所得<sup>[8]</sup>。全钾含量的变化趋势表现为随土层深度增加而增大,可能是因为全钾在土壤母质层中含量富足,有较强的养分补给能力<sup>[9]</sup>。

3) 碱解氮、速效钾、有效磷含量

碱解氮含量在 A 层达到最大值,为 107.34 mg/kg, D 层最小,为 48.01 mg/kg,各土层含量排序为 A 层>B 层>C 层>E 层>D 层;A 层与其余土层间均存在极显著差异(P<0.01)。速效钾含量在 A 层值最大,为 37.60 mg/kg, D 层最小,为 18.01 mg/kg;A 层与其余土层间均存在显著相关性(图 8)。此外,各土层的有效磷含量均较低,A 层与其余土层间存在显著差异性(图 9)。

2.1.3 土壤重金属含量分析

试验结果表明,不同样地的重金属除全铜、全镉外,其余元素在各土层间均无显著差异性。全铜含量在 A 层

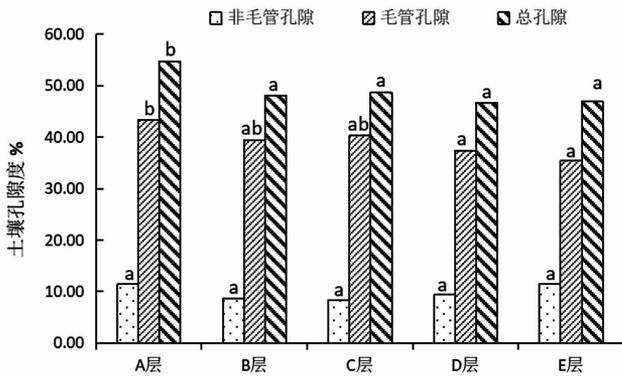


图 3 不同土层深度的土壤孔隙度

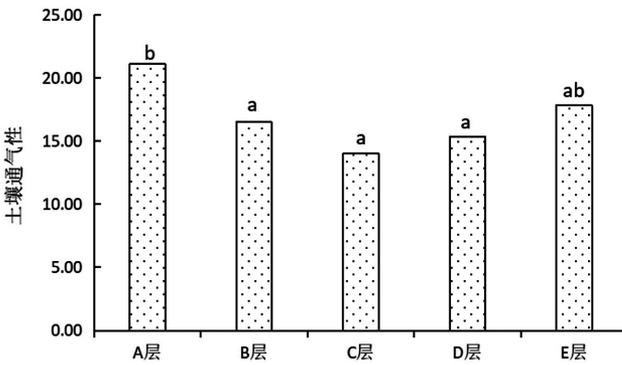


图 4 不同土层深度的土壤通气性

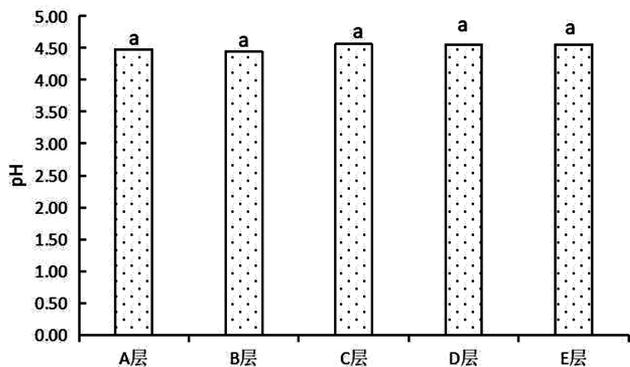


图 5 不同土层深度的 pH 值

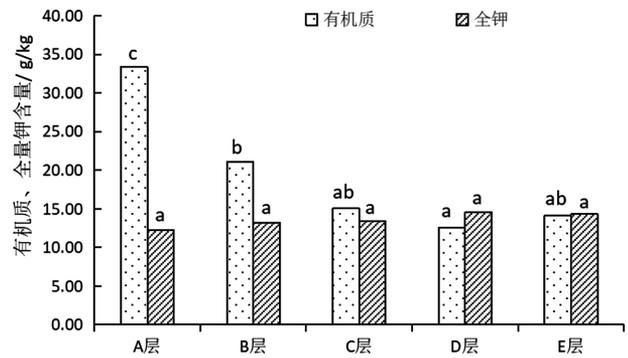


图 6 不同土层深度的有机质、全钾含量

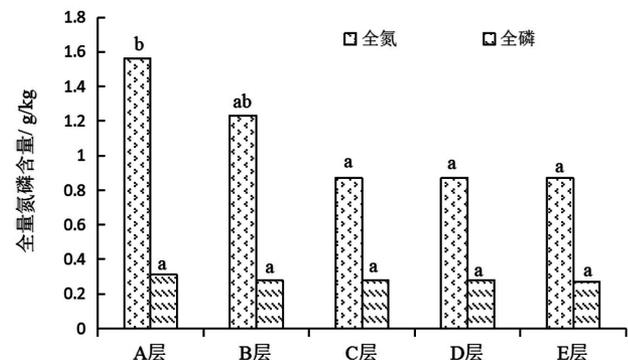


图 7 不同土层深度的全量氮、磷含量

与D层间存在显著差异性, 其与全锌、全铅含量的最大值都出现在D层, 分别是22.67 mg/kg、63.92 mg/kg、92.20 mg/kg; 全镉含量排序为A层>D层>B层>C层>E层, A层与B、C、E层间均存在显著差异性; 全铬、全镍均在C层达到最大值, 分别为50.26 mg/kg、18.64 mg/kg, A层值均最小, 分别为44.76 mg/kg、16.73 mg/kg; 全砷含量在B层值最高, 为32.58 mg/kg, 在E层值最低, 为29.73 mg/kg; 全汞在各土层含量均较低, 排序为E层>C层>A层>B层>D层(图10~11)。各重金属元素在不同土层间的含量分布无明显规律, 各土层深度的重金属含量排序均为全铅>全锌>全铬>全砷>全铜>全镍>全汞。根据《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)对土壤中重金属含量进行评价, 样本的全铅含量超标。铅主要来自污水灌溉、矿物分解、尾气排放等<sup>[10]</sup>, 由于采样地点靠近公路边, 汽车尾气排放可能是铅污染的主要原因。

对土壤重金属元素进行相关性分析, 结果表明(表2), 不同土层深度对重金属元素间的相关性无影响。全铜与全镉、全铬显著正相关, 与全镍、全砷极显著正相关; 全锌与全铅、全镉、全镍、全汞显著正相关; 全镉与全镍极显著正相关, 与全砷显著正相关; 全铬与全镍显著正相关, 与全砷极显著正相关, 与全铅存在极显著负相关; 全镍与全砷极显著正相关。

## 2.2 土壤理化性质与重金属含量的相关性分析

### 2.2.1 土壤物理性质与重金属含量的相关性分析

对3个样地的土壤物理性质与重金属进行相关性分析, 结果显示(表3), 容重与镍元素表现为极显著负相关; 最大持水量与铅元素存在显著相关性; 毛管持水量和毛管孔隙度与铅、汞元素均显著负相关; 通气性与铅、铬表现出极显著相关性, 与汞存在显著相关性。

### 2.2.2 土壤化学性质与重金属含量的相关性分析

pH除与铬无显著相关性外, 与其他重金属均存在显著或极显著相关性, 与全锌相关系数达到0.811; 有机质与铅、镉、铬、镍、砷均存在极显著相关性; 全氮与锌、汞无显著相关性, 与全砷的相关系数较大, 为0.765; 全磷与全砷、全镍的相关系数极高, 分别达0.920和0.923; 全钾仅与铜、镍、砷不存在显著相关性; 碱解氮与锌、汞无显著相关性, 与铅存在显著负相关性, 与其余重金属元素存在极显著正相关性; 有效磷仅与镉存在极显著相关性; 速效钾与铜有显著相关性, 与镉、铬、镍和砷极显著相关(表3)。

### 2.2.3 土壤理化性质与重金属含量的冗余分析

对影响样地重金属含量的因素进行冗余分析(RDA)得出, 全磷解释率最大为50.7%, 其次为全氮, 为37.2%, 土壤通气性最小, 仅为7.4%。其中, 全钾、全氮、有机质对全铬影响较大, 碱解氮、速效钾、全磷对全砷影响较大, 全磷对全铜影响较大, 全磷、全氮、碱解氮对全镍、

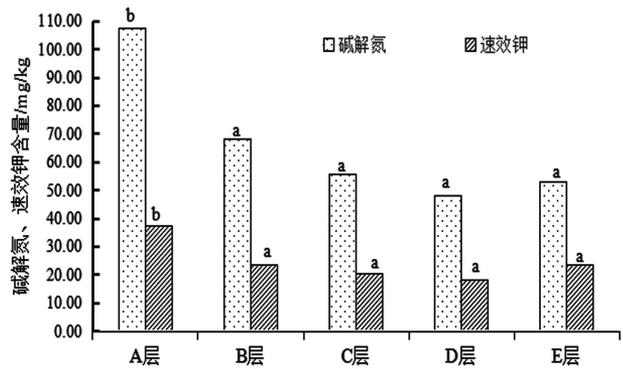


图8 不同土层深度的碱解氮、速效钾含量

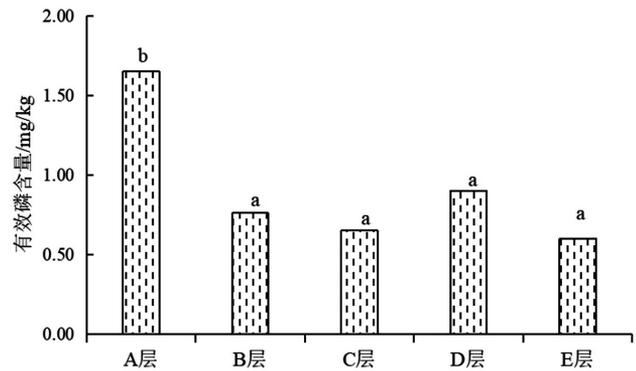


图9 不同土层深度的有效磷含量

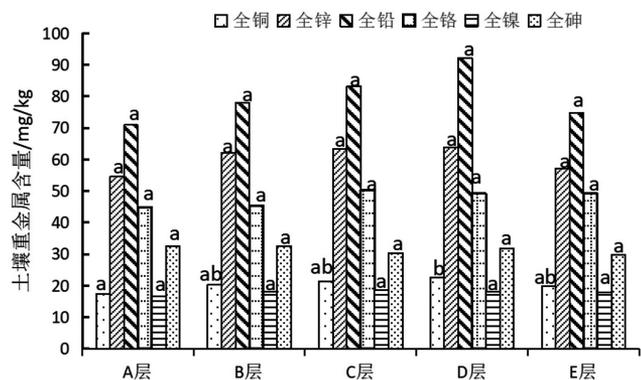


图10 不同土层深度的土壤重金属含量

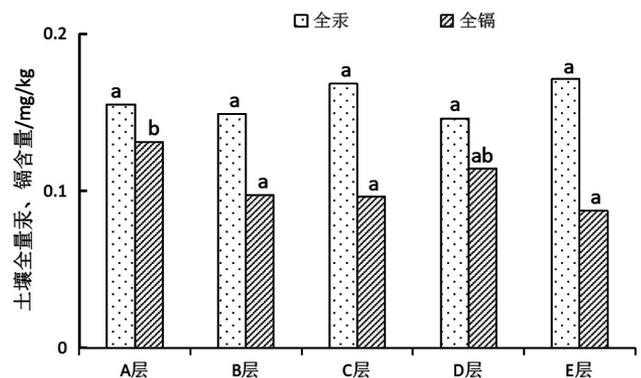


图11 不同土层深度的土壤全汞、全镉含量

表2 田头山林地土壤重金属元素间的相关性

重金属元素	全铜	全锌	全铅	全镉	全铬	全镍	全砷	全汞
全铜	1							
全锌	0.49	1						
全铅	-0.28	0.63*	1					
全镉	0.73*	0.67*	0.13	1				
全铬	0.74*	-0.13	-0.81**	0.40	1			
全镍	0.91**	0.61*	-0.20	0.80**	0.68*	1		
全砷	0.91**	0.46	-0.37	0.77*	0.80**	0.98**	1	
全汞	0.19	0.75*	0.50	0.35	-0.22	0.38	0.25	1

注：\*代表显著相关性 (P<0.05)，\*\*代表极显著相关性 (P<0.01)

表3 土壤理化指标与重金属的相关性分析

理化指标 重金属元素	全铜	全锌	全铅	全镉	全铬	全镍	全砷	全汞
土壤容重	-0.126	-0.091	-0.126	-0.091	0.165	-0.359**	-0.198	-0.278*
最大持水量	-0.066	-0.232	-0.284*	0.123	0.161	0.011	0.095	-0.223
毛管持水量	-0.024	-0.241	-0.289*	0.036	0.189	0.016	0.074	-0.268*
最小持水量	-0.068	-0.311*	-0.333**	-0.017	0.180	-0.042	0.032	-0.344**
毛管孔隙度	-0.241	-0.024	-0.289*	0.036	0.189	0.016	0.074	-0.268*
土壤通气性	-0.232	0.217	0.311**	0.127	-0.387**	-0.107	-0.122	0.294*
pH	0.363**	0.811**	0.574**	0.444**	-0.215	0.402**	0.275*	0.674**
有机质	0.176	-0.045	-0.430**	0.500**	0.460**	0.399**	0.506**	-0.079
全氮	0.480**	0.169	-0.434**	0.676**	0.626**	0.683**	0.765**	-0.005
全磷	0.781**	0.579**	-0.179	0.760**	0.623**	0.923**	0.920**	0.359**
全钾	0.007	-0.745**	-0.749**	-0.347**	0.507**	-0.132	-0.015	-0.709**
碱解氮	0.396**	0.244	-0.292*	0.680**	0.483**	0.619**	0.686**	0.108
有效磷	0.006	0.178	0.216	0.362**	-0.167	0.043	0.038	0.105
速效钾	0.312*	0.246	-0.170	0.665**	0.356**	0.524**	0.563**	0.139

注：\*代表显著相关性 (P<0.05)，\*\*代表极显著相关性 (P<0.01)

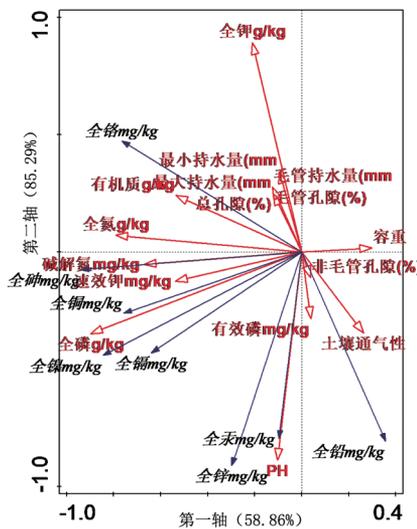
全镉影响较大，pH、全钾对全汞、全锌影响较大，pH、全钾、土壤通气性对全铅影响较大 (图 12)。

对影响样地土壤重金属含量的因素进行途径分析 (图 13) 可知，全磷对全铜有显著正效应，直接途径系数为 0.99；全氮对全铅有显著负效应，直接途径系数为 -0.66；有机质与全氮、全磷、碱解氮均存在正效应，间接影响全铜活性，但在碱解氮的影响下，全铜的活性被减弱；速效钾对全氮、碱解氮均有显著正效应，间接影响全铬活性，但在全铅影响下，全铬活性被减弱。由此表明除了各元素间的直接效应外，间接效应也不容忽视。

### 3 结论与讨论

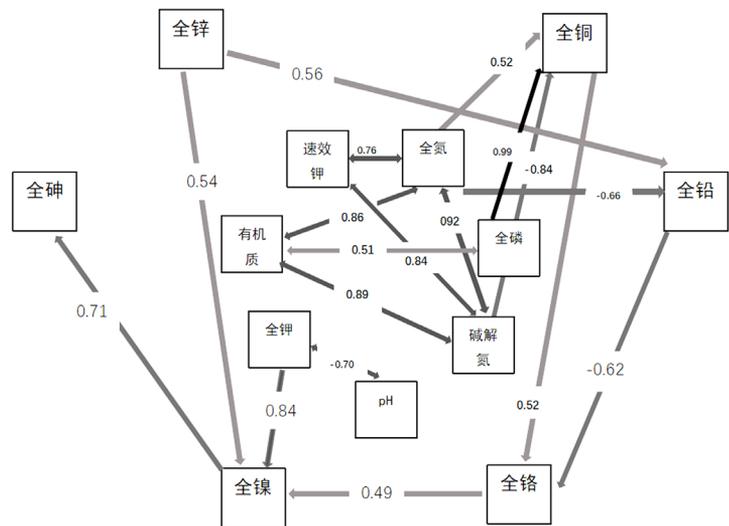
#### 3.1 土壤物理性质

土壤容重以 0~20 cm 剖面层最小，其他层次无明显差异；持水量、孔隙度在表层土中最大，且随土层深度增加而减小，与王晓荣<sup>[1]</sup>对湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量的研究结论基本一致。土壤通气性表现为随土层深度增加而先减小后增大，这一现象可能与植物根系呼吸有关：表层土壤通气性较好，随着土



注：红色箭头代表土壤理化性质指标，蓝色箭头代表土壤重金属指标

图 12 影响样地土壤重金属含量因素的 RDA 分析



注：图中去除路径系数绝对值 <0.5 的路径；箭头颜色的深浅代表影响程度，颜色越深，影响越大

图 13 影响样地土壤重金属含量因素的途径分析

层深度增加,容重增大,土壤的氧气含量急剧下降,通气性减小;随着土层深度持续增加,植物为获得氧气,在根系形成具有充气孔隙的通气组织,补充根系周围的氧气,使得较深土层处的通气性增大<sup>[12]</sup>。

### 3.2 土壤化学性质

土壤 pH 在各土层基本维持在 4.5 左右,无显著差异性。有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量均为表层最高,随土层深度增加,基本表现为减少的趋势,说明土壤营养元素具有明显表聚性特征,与多数学者的研究结论一致<sup>[13-15]</sup>。土壤有效磷在各土层的含量无显著差异,且含量较低,是因为在酸性的亚热带森林土壤中,磷元素易与铁、铝的氢氧化合物及其离子形成不溶性的磷化合物沉淀,导致森林土壤磷含量普遍欠缺<sup>[16]</sup>。

重金属除全铜、全镉外,其余元素的含量在各土层间均无显著差异,说明不同土层重金属的迁移性不显著,且表层重金属含量较低。土壤中重金属的含量排序与古一帆<sup>[17]</sup>的结论不一致,可能是因为本研究采样地点靠近公路边,汽车尾气排放导致了全铅含量较高;同时也与李明月<sup>[18]</sup>对碧流河下游重金属研究得出锌和镉含量较高的结论不符,可能是后者采样点周围是放牧区和海蜇皮加工厂而导致的差异。土壤中全锌与全铅、全镉等重金属元素间存在显著相关性,说明重金属元素间可能具有同源性。

### 3.3 土壤理化性质与重金属相关性

土壤理化性质与重金属元素存在相关性。其中 pH 与有机质对土壤重金属元素关系密切,与王妍<sup>[19]</sup>的研究结果不同,可能是因为本研究样地土壤 pH 值较低,与碱性土壤相比,在酸性土壤中有有机质对重金属有更强的吸附性<sup>[20]</sup>。通过冗余分析得出重金属元素活性的主要影响因子为全磷、全钾、碱解氮、pH、有机质、速效钾、土壤通气性,通过途径分析进一步说明理化性质直接和间接的效应最终影响重金属活性。这与周曼<sup>[21]</sup>

的结论基本一致,有机质可以通过多个路径影响重金属含量,其随着含量增加,改变土壤胶体结构,增强吸附性。此外,全氮对全铅产生负效应的的原因可能是:土壤蔗糖酶的酶促作用对增加土壤中易溶性营养物质至关重要<sup>[22]</sup>,且与全氮元素表现为显著正相关<sup>[23]</sup>,而与全铅表现为显著负相关<sup>[24]</sup>。

除了土壤理化性质的影响,植物对重金属也有富集作用,因此重金属活性由多种生态因子综合影响。该研究初步分析了土壤理化性质与重金属间的相关性,可为深圳田头山自然保护区的管理提供参考。未来有必要结合阳离子交换量以及重金属有效性,进一步探索土壤理化性质与重金属间的影响机制。

注:图片均由作者自绘

#### 参考文献:

- [1] 吕世丽,李新平,李文斌,等.牛背梁自然保护区不同海拔高度森林土壤养分特征分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(4):161-168.
- [2] 赵超.不同海拔毛竹林土壤特征及肥力评价的研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [3] 戴凌,黄志宏,文丽,等.长沙市不同森林类型土壤养分含量与土壤酶活性[J].中南林业科技大学学报,2014,34(6):100-105.
- [4] ZHANG B C, ZHOU X B, ZHANG Y M. Responses of Microbial Activities and Soil Physical-chemical Properties to the Successional Process of Biological Soil Crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang [J]. JOURNAL OF ARID LAND, 2015, 7(1): 101-109.
- [5] 孟楚,郑小贤,王威,等.北京八达岭林场水源涵养林分结构与土壤的相关性研究[J].西北林学院学报,2016,31(4):99-105.
- [6] 赵晴,刘莉娜,陈丹,等.深圳田头山市级自然保护区的植物资源调查[J].绿色科技,2016(14):4-7.
- [7] 张凯旋,商侃侃,达良俊,等.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.
- [8] 王丽媛.滇中红壤不同土地利用类型坡面土壤养分及水分的空间分布[D].昆明:西南林业大学,2013.
- [9] 谢寄托.莽山常绿阔叶林土壤养分分布规律研究[D].长沙:中南林业科技大学,2014.
- [10] 关义新,戴俊英,林艳,等.水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J].植物生理学通讯,1995,31(4):293-297.
- [11] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等.湖北省主要

森林类型土壤理化性质及土壤质量[J].中南林业科技大学学报,2020,40(11):156-166.

- [12] 梁永超.土壤通气性与植物根系代谢[J].土壤学进展,1994,22(4):34-39.
- [13] 王凯博,时伟宇,上官周平,等.黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):80-86.
- [14] 秦娟,唐红心,杨雪梅,等.马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J].生态环境学报,2013,22(4):598-604.
- [15] 王月玲,王思成,李娜,等.宁南山区退耕地不同植被类型对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2011,31(2):95-98.
- [16] 李胜蓝.中亚热带不同土地利用方式土壤磷素有效性及分级[D].长沙:中南林业科技大学,2015.
- [17] 古一帆,何明,李进玲,等.上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系[J].上海交通大学学报(农业科学版),2009,27(6):601-605+623.
- [18] 李明月.碧流河下游沿岸土壤特性及重金属污染生态风险评估[D].大连:辽宁师范大学,2018.
- [19] 王妍.呼和浩特市保护地苔藓植物对土壤性质及重金属的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2020.
- [20] 陈同斌,陈志军.水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J].应用生态学报,2002,13(2):183-186.
- [21] 周曼,徐燕,赵玉浩,等.N、P添加对亚热带森林土壤重金属活性的影响[J].环境科学与技术,2021,44(4):23-27.
- [22] 杨鹏鸣,周俊国.不同肥料对土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性的影响[J].广东农业科学,2011,38(11):78-80.
- [23] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征[J].水土保持学报,2019,33(2):207-213.
- [24] 赵兴青,朱旭炎,黄兴,等.安徽铜陵矿区不同功能区域土壤中重金属对微生物及酶活性的影响[J].环境科学研究,2019,32(12):2139-2147.

#### 作者简介:

窦苗/1994年生/女/陕西渭南人/硕士/广东省林业科学研究院(广州510520)/科研助理/专业方向为森林康养

(\*通讯作者)陶玉柱/1982年生/男/辽宁丹东人/博士/广东省林业科学研究院(广州510520)/高级工程师/研究方向为森林生态学/E-mail:taoyuzhuyau@163.com

高瑶瑶/1993年生/女/陕西咸阳人/硕士/广东省林业科学研究院(广州510520)/科研助理/专业方向为森林康养