

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.012

川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素的空间变异性分析

熊凯^{1,2}, 赵玉娟¹, 陈健^{1,2}, 张运^{1,2}, 赵广东^{1,2*},
杨洪国³, 史作民^{1,2,4}, 许格希^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 四川米亚罗森林生态系统定位观测研究站, 四川理县 623100; 3. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 4. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037)

摘要: [目的] 探究川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素的空间异质性, 为评价川西亚高山林区土壤质量、保护区域生态环境和研究生物多样性维持机制提供科学依据。[方法] 在四川米亚罗省级自然保护区亚高山原始暗针叶林 9.6 hm² (400 m × 240 m) 动态样地, 采用野外布点采样、实验室测定、经典统计学和地统计学分析相结合的方法, 分析动态样地表层 0~10 cm 土壤微量元素铁 (Fe)、锰 (Mn)、铜 (Cu)、锌 (Zn) 的空间异质性及其与土壤 pH、有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 之间的相关性。[结果] (1) 米亚罗亚高山原始暗针叶林动态样地的土壤 Fe 含量均值为 17.22 g·kg⁻¹, Mn、Cu、Zn 含量均值分别为 423.09、4.33、47.91 mg·kg⁻¹; (2) 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的高值主要呈斑块状分布在动态样地东侧高海拔区域, 土壤 Zn 的空间分布较简单, 连续性较强; (3) 土壤微量元素含量的变异系数为 29.76%~63.84%, 其中, Fe 含量的变异系数为 29.76%, Mn 含量的变异系数为 63.84%。土壤微量元素含量的块基比值范围为 0.08~0.50, 土壤 Mn、Cu 呈现强烈的空间自相关性, 土壤 Fe、Zn 呈现中等程度的空间自相关性; (4) 除了土壤 Cu 与 pH、土壤 Zn 与 SOC、土壤 Zn 与 TK 之间的相关性不显著 ($P > 0.05$) 外, 其它 17 对土壤性质之间均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 相关。[结论] 川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素 Fe、Mn 含量丰富, Cu、Zn 含量较低。土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 的空间分布表现出明显的空间自相关特征。土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 与土壤 pH、SOC、TN、TP、TK 之间呈较为普遍的显著相关。

关键词: 亚高山; 原始暗针叶林; 地统计学; 土壤微量元素; 空间异质性

中图分类号: S153.6[†]

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)06-0099-08

微量元素作为森林土壤的组成成分, 为森林生物生长提供了必不可少的营养, 其对森林生物的重要作用有时甚至超过了大量元素^[1]。在成土母质^[2]、表生地球化学作用^[3]和人为干扰^[4]等多种因素的共同作用下, 土壤微量元素的含量和空间分布在一定区域、尺度与时间内具有高度的空间异质性^[5-6]。

研究表明, 土壤母质、气候以及地形等结构性因素能够增强土壤性质的空间自相关性, 而试验误差、取样设计以及人为干扰等随机因素会降低土壤性质的空间自相关性^[7]。认识并掌握土壤微量元素的空间变异特征是开展土壤环境质量评价的重要前提^[8]。

收稿日期: 2021-04-21 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2016MA004、CAFZC2017M004); 国家重点研发计划课题 (2017YFC0505001)

* 通讯作者: 赵广东, 博士, 副研究员。主要研究方向: 森林生态学和植物生理生态学。E-mail: zhaogd@caf.ac.cn

地统计学以传统统计学为基础,以变异函数为主要工具,能够有效揭示属性变量在空间上的分布特征及其变异性^[9-11],已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异性最有效的方法之一^[12-13]。运用地统计学等理论和方法,我国已经进行的土壤微量元素变异特征研究集中在农田^[9,14-15]、烟草种植区^[16]、草地^[17],而森林土壤主要围绕碳、氮、磷、钾等大量元素开展^[7,18-19]。位于青藏高原东南缘的川西亚高山林区是我国西南林区的主体和长江上游重要的水源涵养地与生态屏障,同时是四川省“四区八带多点”生态安全战略格局的重要组成部分,该林区原有的主要森林类型是以岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana* (Rehder & E. H. Wilson) Tang S. Liu)为优势种的亚高山原始暗针叶林^[20]。亚高山岷江冷杉原始林土壤有机层的Zn、Mg、Mn和Ca含量显著高于矿质土壤层,Fe含量则相反,而土壤有机层和矿质土壤层Na含量的差异不显著^[21];同为寒温性针叶林的祁连山青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)林不同土层有效微量元素平均含量大小顺序为Fe>Mn>Cu>B>Zn,并且具有明显的“表聚效应”^[22]。目前,尚未有亚高山原始暗针叶林土壤微量元素全量空间变异特征的相关报道。

本文以川西米亚罗亚高山原始暗针叶林9.6 hm²动态样地表层0~10 cm土壤为研究对象,通过野外采样和实验室分析,运用经典统计学和地统计学相结合的方法,分析了土壤微量元素Fe、Mn、Cu、Zn全量的富集程度、空间格局及其变异性,研究结果可为川西亚高山林区的土壤环境质量评价、区域生态环境保护 and 生物多样性维持机制以及四川省“四区八带多点”生态安全战略格局的构建等提供基础数据和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县的米亚罗省级自然保护区(31°11'~31°47'N,102°35'~103°31'E),海拔2458~4619 m,属于青藏高原东缘与四川盆地的过渡地带。年平均气温2.7℃,年均降水量约850 mm,多集中在生长季^[23]。

2016年7月至2019年9月,依据美国热带森林研究中心(CTFS)的技术规程^[24]和中国森林生物多样性监测网络(CForBio)的建设标准,在四川米亚罗省级自然保护区的毕棚沟(31°14'~31°19'N,102°53'~102°57'E)建立了1个9.6 hm²(400 m×240 m)的亚高山原始暗针叶林动态样地(图1),坡向西南,平均坡度约31.07°,林分郁闭度0.5~0.7。基于2019年样方调查数据,岷江冷杉为该动态样地的建群种,优势乔木包含岷江冷杉、糙皮桦(*Betula utilis* D. Don)以及密枝圆柏(*Juniperus convallium* Rehder & E. H. Wilson);灌木主要有峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis* Rolfe)、紫花茶藨子(*Ribes luridum* Hook. f. et Thoms.)、云南樱桃(*Cerasus yunnanensis* (Franch.) Yü et Li)、红脉忍冬(*Lonicera nervosa* Maxim.)和山光杜鹃(*Rhododendron oreodoxa* Franch.)等。主要草本有高山冷蕨(*Cystopteris montana* (Lam.) Bernh. ex Desv.)、蟹甲草(*Parasenecio forrestii* W. W. Smith et Saml)、三穗薹草(*Carex tristachya* Thunb.)等。土壤类型主要为山地棕壤,石砾含量较多。

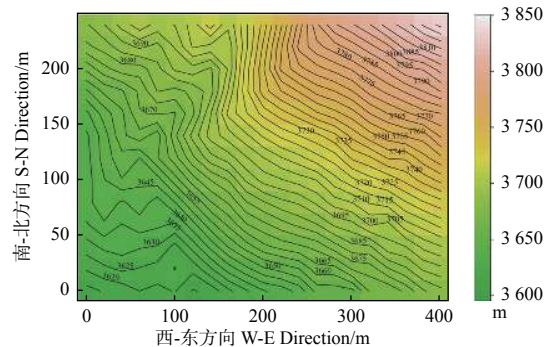


图1 米亚罗亚高山原始暗针叶林动态样地地形特征
Fig. 1 The topographic characteristics of Miyalu subalpine primary dark coniferous forest dynamics plot

1.2 研究方法

2019年8月,参考CTFS的土壤采样方案^[25],以川西米亚罗亚高山原始暗针叶林9.6 hm²动态样地每个20 m×20 m样方4个顶角的镀锌方管样桩为基点,从东、东南、南、西南、西、西北、北、东北共8个方向中随机选1个方向向外延伸采集土壤样品,若基点处于样地边界,则该基点的延伸方向只从5个方向中随机选取,使所有采样点均位于动态样地内,在延伸方向上距离基点2、5、8 m处随机选取2处作为土壤的延伸采样点^[26]。清除各延

伸采样点和基点处土壤表层枯落物和腐殖质等杂质后, 使用直径 5 cm 土钻采集表层 0~10 cm 土壤样品约 300 g, 共计 819 个。土壤样品进行自然风干、碾磨、过 100 目筛等预处理。2019 年 10 月至 2020 年 1 月, 采用 IRIS Intrepid II XSP 等离子发射光谱仪 (Thermo Electron, Waltham, USA) 测定土壤 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量。

1.3 数据处理

为保证数据的有效性, 避免特异值使半方差函数发生畸变, 将处于样本均值加减 3 倍标准差区间外的特异值剔除, 再进行描述性统计分析和地统计学分析^[27]。计算各微量元素数据的均值、中位数、最大值、最小值、标准差和变异系数。

在地统计学分析前对各土壤微量元素数据进行 One sample Kolmogorov -Smirnov Test 正态分布检验^[26], 以减少数据的比例效应。若数据不符合正态分布, 则对数据进行正态分布转换。通过半方差理论变异函数 $r(h)$ 计算获取半方差值随滞后距 h 增加而变化的散点图^[28], 采用指数模型、球状模型、高斯模型等对散点图进行拟合。根据决定系数 (R^2) 与残差平方和 (RSS) 的大小判断模型拟合能力^[29]。

土壤微量元素含量数据的描述性统计分析、半方差理论函数分析分别在 SPSS 20.0、GS + 9.0 软

件中完成, 结合土壤采样点在动态样地中的位置, 通过 R 3.6.0 软件中的 gstat 程序包实现对各土壤微量元素的 Kriging 插值。使用 SPSS 20.0 的 Pearson 相关性分析输出土壤微量元素与土壤 pH、SOC、TN、TP、TK 之间的相关结果, 土壤的相关性分析使用未剔除特异值的微量元素原始数据进行计算。

2 结果与分析

2.1 土壤微量元素的描述性统计分析

川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤 Fe 含量均值为 $17.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn、Cu、Zn 含量均值分别为 423.09 、 4.33 、 $47.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的差异较大, Fe 含量最高, Cu 含量最低。土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的变异系数为 29.76% ~ 63.84% , Mn 含量的变异系数最高, 达 63.84% , 而 Fe 含量的变异系数最低, 为 29.76% 。Fe 含量服从正态分布, Mn、Cu、Zn 含量服从对数正态分布。变异系数 (CV) 反映了土壤性质的离散程度, 依据变异系数判断土壤性质变异程度的标准为: $CV < 10\%$ 为弱变异, $10\% \leq CV \leq 100\%$ 为中等变异, $CV > 100\%$ 为强变异^[30]。本研究中, 土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均呈中等程度的变异 (表 1)。

表 1 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的描述性统计特征

Table 1 The descriptive statistical characteristics of soil Fe, Mn, Cu, Zn content

土壤微量元素 Soil trace elements	样本数 Number of samples	均值 Mean	中位数 Median	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation	变异系数 Variance Coefficient/%	分布类型 Distribution type
Fe/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	803	17.22	17.22	32.40	5.38	5.12	29.76	N
Mn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	797	423.09	368.11	1580.82	74.57	270.12	63.84	LN
Cu/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	692	4.33	4.10	11.11	0.14	2.21	50.96	LN
Zn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	801	47.91	47.30	93.89	15.49	14.46	30.19	LN

注: N: 正态分布; LN: 对数正态分布。

Notes: N: Normal distribution; LN: Logarithmic Normal distribution.

2.2 土壤微量元素的空间异质性特征

对川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量进行半方差函数模型拟合, 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均具有较好的半方差函数模型拟合结果 (图 2)。表 2 中模型拟合

的决定系数与残差平方和表明: 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量均采用指数模型描述时, 模型的拟合程度最高; 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的块基比值介于 $0.08\sim 0.50$, 土壤 Mn、Cu 含量的块基比值均低于 0.25, 二者在研究尺度上呈强烈程度的空间

自相关性, 土壤 Fe、Zn 含量的块基比值介于 0.25~0.75, 存在中等程度的空间自相关性。土壤

Fe、Mn、Cu、Zn 含量分别在 255.0、26.7、18.3、511.8 m 范围内呈空间自相关。

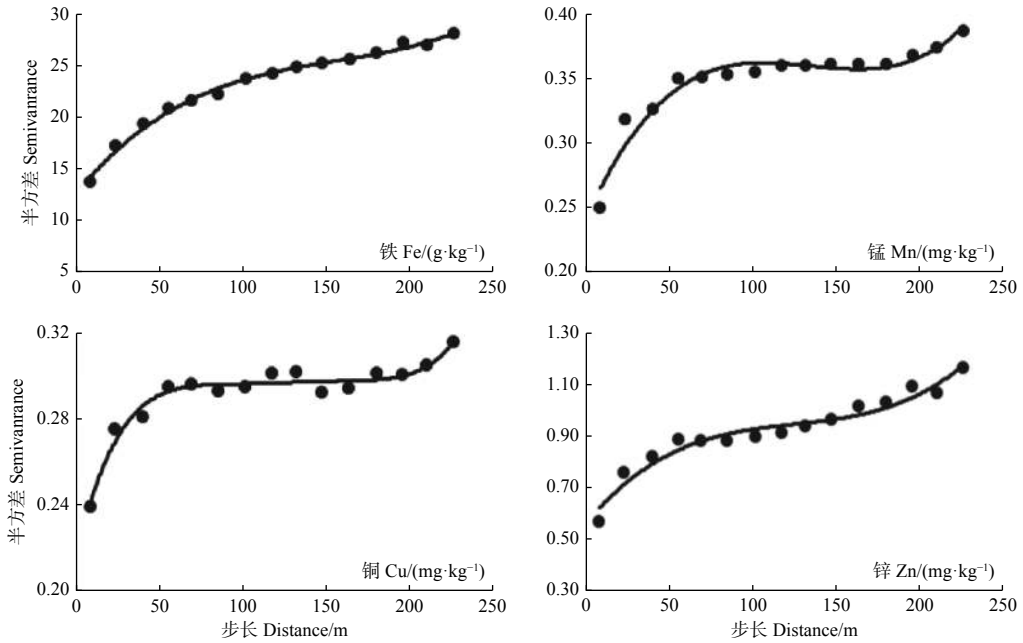


图2 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的半方差函数曲线

Fig. 2 Semivariograms map of soil Fe, Mn, Cu, Zn content

表2 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的半方差函数模型类型及参数

Table 2 The semivariogram models and parameters of soil Fe, Mn, Cu, Zn content

土壤微量元素 Soil trace elements	模型 Model	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块基比值 $C_0 / C_0 + C$	变程 A/m	决定系数 R^2	残差平方和 RSS
铁 (Fe)	指数模型	13.10	28.28	0.46	255.0	0.99	2.84
锰 (Mn)	指数模型	0.03	0.36	0.08	26.7	0.82	2.56×10^{-3}
铜 (Cu)	指数模型	0.03	0.30	0.09	18.3	0.75	1.04×10^{-3}
锌 (Zn)	指数模型	0.64	1.27	0.50	511.8	0.90	3.03×10^{-2}

2.3 土壤微量元素的空间分布格局

川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的空间分布格局存在一定的差异性 (图3)。土壤 Fe 含量的低值主要分布在动态样地的西侧, 高值主要分布在动态样地的东侧, 呈大面积团聚状, 并在动态样地的西北角有小范围分布。土壤 Mn、Cu 含量的空间分布格局相似, 低值多分布在动态样地的西侧, 高值主要分布在动态样地的东侧, 并呈不规则斑块状。土壤 Zn 含量的低值分布在动态样地的西侧, 高值分布在动态样地的东侧, 其空间分布较简单, 连续性较强。

2.4 土壤微量元素与土壤 pH 和养分的相关性

川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素与土壤 pH 和养分的相关性分析结果 (表3) 表明: 土壤微量元素与土壤 pH 和养分多数呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 相关; 其中, TP 与 Cu 的相关系数最大 (0.60), SOC 与 Mn 的相关系数最小 (0.07); 土壤 Fe、Mn、Cu 均与土壤 SOC、TN、TP 呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 但三者与土壤 TK 均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 负相关; 土壤 Fe、Mn、Zn 与土壤 pH 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。此外, 土

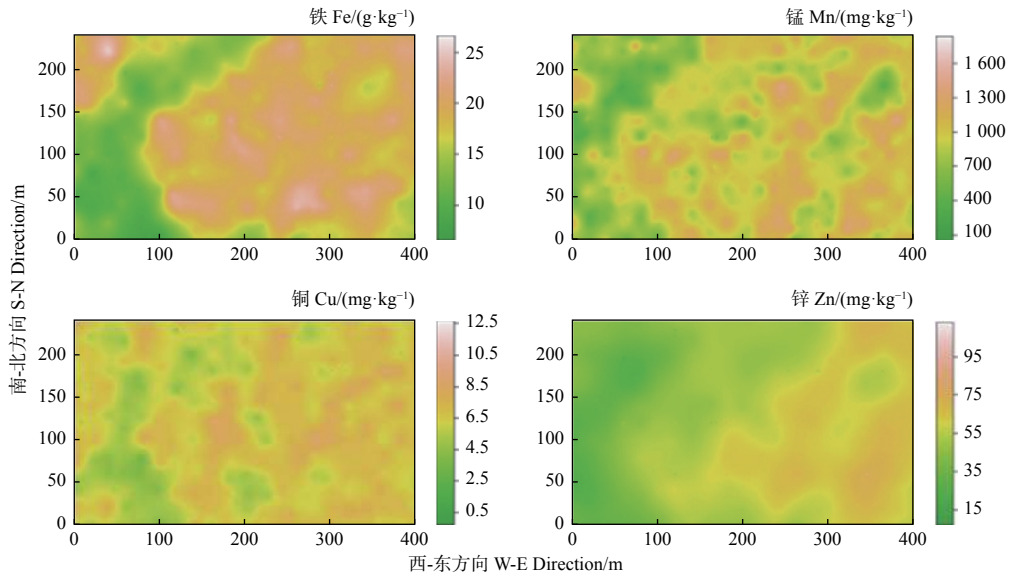


图3 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的空间分布格局

Fig. 3 The spatial distribution pattern of soil Fe, Mn, Cu, Zn content

表3 土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 与 pH、SOC、TN、TP、TK 的相关性分析

Table 3 The correlation analysis of soil Fe, Mn, Cu, Zn with pH, SOC, TN, TP, TK ($n = 805$)

土壤微量元素 Soil trace elements	pH	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK
铁 (Fe)	0.22**	0.08*	0.18**	0.37**	-0.35**
锰 (Mn)	0.37**	0.07*	0.22**	0.31**	-0.07*
铜 (Cu)	-0.03	0.48**	0.55**	0.60**	-0.41**
锌 (Zn)	0.42**	-0.03	0.11**	0.34**	0.03

注:**表示极显著相关 ($P < 0.01$), *表示显著相关 ($P < 0.05$)。

Notes:**represent significant correlations at $P < 0.01$, *represent significant correlations at $P < 0.05$.

壤 Zn 与 TN、TP 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 土壤微量元素含量的基本特征

依据全国土壤环境质量标准, 川西米亚罗亚高山原始暗针叶林的土壤 Cu、Zn 含量在土壤环境质量标准一级标准的范围内^[31]。川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤 Cu、Zn 含量均低于亚热带甜储 (*Castanopsis eyrei* (Champ. ex Benth.) Tutch.) 天然林 (36.29、74.12 mg·kg⁻¹) 与川西滇北地区箭竹-冷杉 (*Fargesia spathacea* Franch.-*Abies fabri* (Mast.) Craib) 林 (12、72 mg·kg⁻¹), 土壤 Mn 含量高于亚热带甜储天然林 (143.38 mg·kg⁻¹) 与川西滇北地区箭竹-冷杉林 (13 mg·kg⁻¹), 土壤 Fe 含量远高于研究区其它微量元素的含量, 与亚热带甜储天然林土壤基本持平^[32-33]。总体来说, 川西米亚罗亚高山原始暗针叶

林土壤微量元素含量基本特征与相近纬度的亚热带天然林及川滇天然林等森林类型存在一定的差异^[32-33], 相对于亚热带天然林和川滇天然林, 动态样地的土壤 Cu、Zn 含量相对较低, Fe、Mn 含量相对较高。研究区内土壤类型属于石砾含量较多的山地棕壤, 其中包含丰富的含铁原生矿物^[21], 这可能是导致川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤 Fe 含量较高的主要原因。该动态样地内地形复杂, 整体海拔落差较大, 且有多处陡坡造成土壤堆积, 雨水冲刷等因素造成了 Cu、Zn 元素的淋溶现象明显, 致使土壤中碳酸盐及金属氧化物向土层深处迁移, 这可能是造成动态样地表层土壤 Cu、Zn 含量较低的原因。

3.2 土壤微量元素含量的空间异质性

块金值 (C_0)、基台值 ($C_0 + C$) 和变程 (A) 反映了各土壤微量元素的空间自相关性强弱程度以及空间自相关范围。块金值 (C_0) 与基台值

($C_0 + C$) 的比值即块基比值在 < 0.25 、 $0.25 \sim 0.75$ 、 > 0.75 的范围, 分别反映了土壤微量元素强、中、弱的空间自相关程度^[30]。川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤 Mn、Cu 含量的块基比值小于 0.25, 表明二者具有强烈的空间自相关性, 在空间尺度上主要受结构性因素主导, 这可能是由于山地棕壤中所含黄铜矿等矿物的分布不均以及动态样地内的复杂地形而引起。土壤 Mn、Cu 含量具有较小的变程和较大的变异系数, 表明结构性因素造成了 Mn、Cu 含量的复杂空间结构, 进而呈现出明显的空间变异性。土壤 Fe、Zn 含量的块基比值表明, 它们在研究尺度上具有中等程度的空间自相关性, 其空间变异特征受到随机因素和结构因素的综合作用。土壤 Fe、Zn 含量具有较大的变程, 表明二者的空间自相关范围较大, 且二者的变异系数较小, 表明其空间分布格局较连续。

川西米亚罗亚高山原始暗针叶林动态样地的海拔从西南角原点至东北角逐渐升高。在海拔最高的动态样地东北角, 因岩石的裸露率高, 导致土壤中原生矿物的含量丰富, 进而造成了该区域土壤微量元素的含量较高。动态样地西北部区域的垂直海拔落差大, 地势陡峭, 雨水冲刷加剧了岩石的裸露程度, 从而形成了土壤 Fe、Mn、Cu 的小范围高值分布带; 而动态样地西侧的低海拔区域土层较厚, 岩石淋溶使土壤表层原生矿物向土壤深层次迁移或侧向流失, 导致了土壤 Mn、Cu 含量具有强烈的空间自相关性, 形成了土壤 Mn、Cu 含量的低值分布区。该动态样地内整体海拔落差较大, 不同的地形条件使局部微环境特征存在明显不同, 进而导致土壤元素的分解及循环过程存在差异^[26, 28]。土壤微量元素在较大尺度上因岩石裸露、淋溶等因素呈现高海拔区域富集, 在较小尺度上由于海拔落差等地形因素的影响呈现明显的空间自相关性, 而且土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量空间自相关的尺度效应存在明显不同, 这说明土壤的空间异质性可能同时受到地形、气候等多种环境因子的影响^[17]。

3.3 土壤微量元素与土壤 pH 和养分的相关性

土壤 pH 和有机质是导致土壤其它性质产生变异的重要原因^[19]。本研究中, 土壤 pH 与土壤 Fe、Mn、Zn 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), SOC 与 Fe、Mn、Cu 呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关。研究表明, 土壤中微量元素的有效态含量

与土壤 pH、有机质之间关系密切^[34-35], 土壤中水溶性和交换性的 Fe、Mn、Zn 元素都会随着土壤 pH 的变化而发生不同程度地转化, 固定成难溶的各种次生矿物或分解为其它形态, 而且土壤微量元素含量还与土壤有机质含量相关, 较高水平的有机质含量可能会导致微量元素随之升高^[36-37], 这可能是土壤 pH、SOC 与土壤微量元素之间存在普遍的显著相关的重要原因。土壤有机质是土壤 TN、TP 等养分的重要来源, 而且土壤有机质与 SOC 之间存在线性正相关^[19], 土壤 TN、TP 与 SOC 之间的密切关系间接导致了土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 与 TN、TP 之间的普遍显著相关。研究表明, 全钾的空间分布主要受到地形与成土母质等因素的影响^[38]。本研究中, 动态样地内垂直海拔落差较大的区域表层土壤覆盖较少, 岩石裸露率较高, SOC 含量较低, 但以原生矿物形态存在的矿物态钾广泛分布于岩石裸露率较高地形的土壤粗粒中, 而矿物态钾占 TK 含量的 90% 以上, 由此导致 TK 含量与 SOC 呈显著负相关, 从而间接使 TK 与土壤微量元素主要呈显著负相关。

4 结论

(1) 川西米亚罗亚高山原始暗针叶林土壤微量元素 Fe、Mn 含量丰富, Cu、Zn 含量较低。

(2) 土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 均属于中等程度变异, 各土壤性质的空间分布表现出明显的空间自相关特征。土壤 Mn、Cu 呈现强烈程度的空间自相关性, 土壤 Fe、Zn 呈现中等程度的空间自相关性。

(3) 除土壤 Cu 与 pH 及土壤 Zn 与 SOC、TK 不显著相关 ($P > 0.05$) 外, 其它土壤性质之间均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 相关, 说明土壤微量元素 Fe、Mn、Cu、Zn 与土壤 pH、SOC、TN、TP、TK 的显著相关关系较为普遍。

参考文献:

- [1] 范文杰, 张洪江, 程金花, 等. 河北省吴桥县土壤微量元素空间分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13 (1): 91-95.
- [2] 王秋兵, 吴殿龙, 韩春兰, 等. 辽宁地区古红土微量元素的地球化学特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40 (4): 789-794.
- [3] 徐尚平, 陶 澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55 (3): 337-345.
- [4] Johnson B G, Johnson, D W. The influence of slash pile burning on

- meadow and upland forest soil micronutrients in the sierra nevada mountains, United States[J]. *Soil Science*, 2019, 184(3): 78-86.
- [5] Yavitt J B, Harms K E, Garcia M N, *et al.* Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47(7): 674-687.
- [6] Dogo A A, Dikko A U, Ojanuga A G, *et al.* Distribution of soil micronutrients of Bakalori Irrigation Project, Zamfara State, Nigeria[J]. *Asian Research Journal of Agriculture*, 2017, 4(2): 1-10.
- [7] 冯 广, 姚 兰, 艾训儒, 等. 鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤空间异质性[J]. *生态学报*, 2016, 36 (23): 7635-7643.
- [8] Zhu Y L, Wang D Y, Li W B, *et al.* Spatial distribution of soil trace element concentrations along an urban-rural transition zone in the black soil region of northeastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(7): 2946-2956.
- [9] Aitta A, El-Ramady H, Alshaal T, *et al.* Seasonal and spatial distribution of soil trace elements around kitchener drain in the northern Nile Delta, Egypt[J]. *Agriculture*, 2019, 9: 152.
- [10] Reza S K, Baruah U, Singh S K, *et al.* Geostatistical and multivariate analysis of soil heavy metal contamination near coal mining area, Northeastern India[J]. *Environmental earth sciences*, 2015, 73(9): 5425-5433.
- [11] Fu C C, Zhang H B, Tu C, *et al.* Geostatistical interpolation of available copper in orchard soil as influenced by planting duration[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(1): 52-63.
- [12] Wang Y X, Liu G H, Zhao Z H. Spatial heterogeneity of soil fertility in coastal zones: a case study of the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21: 1826-1839.
- [13] 时雷雷, 骆土寿, 许 涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25 (3): 285-293.
- [14] 余慧敏, 朱 青, 傅聪颖, 等. 江西鄱阳湖平原区农田土壤微量元素空间分异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (1): 172-184.
- [15] 宋丰骥, 常庆瑞, 钟德燕, 等. 黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30 (1): 36-42.
- [16] 武德传, 施寒丰, 王维洁, 等. 黔南喀斯特地区植烟土壤有效态中微量元素空间变异及影响因子——以黔南山区为例[J]. *山地学报*, 2017, 35 (6): 826-834.
- [17] 邓邦良, 袁知洋, 郭晓敏. 武功山草甸土壤微量元素分布及对人为干扰的响应[J]. *草业科学*, 2015, 32 (10): 1555-1560.
- [18] Liu L, Wang H, Dai W, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 867-876.
- [19] 王 华, 陈 莉, 宋 敏, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林土壤磷钾养分空间异质性[J]. *生态学报*, 2017, 37 (24): 8285-8293.
- [20] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析[J]. *林业科学*, 2005, 41 (4): 189-193.
- [21] 王 壮, 杨万勤, 吴福忠, 等. 高山森林林窗对苔藓及土壤微量元素含量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 (6): 2111-2118.
- [22] 赵维俊, 刘贤德, 金 铭, 等. 祁连山青海云杉林土壤有效微量元素含量特征[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (2): 386-391.
- [23] Ni X Y, Yang W Q, Li H, *et al.* The responses of early foliar litter humification to reduced snow cover during winter in an alpine forest[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(4): 453-461.
- [24] Condit R. *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots*[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [25] John R, Dalling J, Harms K, *et al.* Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(3): 864-869.
- [26] 杨秀清, 史 婵, 王旭刚, 等. 关帝山云杉次生林土壤的空间异质性及其与地形相关性[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15 (4): 16-24.
- [27] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. *生态学报*, 2012, 32 (18): 5673-5682.
- [28] Du H, Wang K, Peng W, *et al.* Spatial heterogeneity of soil mineral oxide components in depression between karst hills, Southwest China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 24(2): 163-179.
- [29] 杨秀清, 韩有志. 关帝山森林土壤有机碳和氮素的空间变异特征[J]. *林业科学研究*, 2011, 24 (2): 223-229.
- [30] 连玉珍, 曹丽花, 刘合满, 等. 色季拉山西坡表层土壤有机碳的小尺度空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42 (9): 70-79.
- [31] 夏家淇. *土壤环境质量标准详解*[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [32] 任晓军. 亚热带甜柑天然林养分分布[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [33] 盛士骏, 肖笃宁, 张桂兰. 川西滇北地区森林土壤的微量元素[J]. *土壤学报*, 1983, 20 (3): 303-312.
- [34] 武 婕, 李玉环, 李增兵, 等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34 (6): 1596-1605.
- [35] 曾曙才, 俞元春. 宁镇丘陵主要森林类型林下土壤中的微量元素初步研究[J]. *林业科学研究*, 1998, 11 (1): 63-69.
- [36] 赵业婷. 基于GIS的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [37] 穆桂珍, 罗 杰, 蔡立梅, 等. 广东揭西县土壤微量元素与有机质和pH的关系分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40 (10): 208-215.
- [38] 梁 贵, 项文化, 赵仲辉, 等. 湘中丘陵区石栎-青冈栎常绿阔叶林土壤钾含量空间异质性及影响因素研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35 (7): 88-93.

Analysis on Spatial Variability of Soil Trace Elements in Miyaluo Subalpine Primary Dark Coniferous Forest of Western Sichuan, China

XIONG Kai^{1,2}, ZHAO Yu-juan¹, CHEN Jian^{1,2}, ZHANG Yun^{1,2}, ZHAO Guang-dong^{1,2},
YANG Hong-guo³, SHI Zuo-min^{1,2,4}, XU Ge-xi^{1,2}

(1. Institute of Forest Ecology, Environment and Nature Conservation, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Miyaluo Research Station of Alpine Forest Ecosystem, Lixian County 623100, Sichuan, China; 3. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] To study the spatial heterogeneity of soil trace elements in Miyaluo subalpine primary dark coniferous forest of western Sichuan so as to provide scientific basis for soil quality evaluation, the protection of regional ecological environment and the research on biodiversity co-existence mechanism of the subalpine forest in Western Sichuan. [Method] A subalpine primary dark coniferous forest dynamics plot (400 m × 240 m) was established in Miyaluo of western Sichuan. By combining field sampling, laboratory measurement, classical statistics and geostatistical analysis, the spatial heterogeneity of 0~10 cm surface soil trace elements were analyzed, including Iron (Fe), Manganese (Mn), Copper (Cu), Zinc (Zn) and their correlations with soil pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) total phosphorus(TP) and total potassium (TK). [Result] (1) The mean content of Fe was 17.22 g·kg⁻¹, and the mean content of Mn, Cu, and Zn were 423.09, 4.33 and 47.91 mg·kg⁻¹ respectively; (2) The high values of soil Fe, Mn, Cu and Zn contents appeared mainly in the high altitude area of the dynamics plot eastern portion and with patch shape, the spatial distribution characteristics of soil Zn was relatively simple with strong continuity; (3) The coefficient of variance (CV) of all soil trace elements content ranged from 29.76%-63.84% and the CVs of soil Fe and Mn were 29.76% and 63.84%. The Nugget/Sill ratio of soil trace element content ranged from 0.08 to 0.50. Mn and Cu showed a strong spatial autocorrelation, whereas Fe and Zn showed a moderate spatial autocorrelation; (4) In addition to the Cu and pH, Zn and SOC, Zn and TK, the other 17 pairs of soil properties had a significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) correlation. [Conclusion] The content of trace elements Fe and Mn in the soil of Miyaluo subalpine primary dark coniferous forest in western Sichuan are high, but the content of Cu and Zn are low. The spatial distribution characteristics of soil Fe, Mn, Cu, Zn content show obvious spatial autocorrelation. There is a universal correlation between soil Fe, Mn, Cu, Zn content and soil pH, SOC, TN, TP, and TK.

Keywords: subalpine; primary dark coniferous forest; geostatistics; soil trace elements; spatial heterogeneity

(责任编辑: 徐玉秀)