DOI: 10.5846/stxb201512082453
冯广,姚兰,艾训儒,黄继红,路兴慧,丁易,臧润国.鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤空间异质性.生态学报,2016,36(23):7635-7643.
Feng G, Yao L, Ai X R, Huang J H, Lu X H, Ding Y, Zang R G.Analysis of soil spatial variability in a subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in southwest Hubei Province.Acta Ecologica Sinica,2016,36(23):7635-7643.

鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤空间异质性

冯 广[1],姚 兰[1,2,*],艾训儒[1],黄继红[3,4],路兴慧[3,4],丁 易[3,4],臧润国[3,4]
1 湖北民族学院林学园艺学院,恩施 445000
2 北京林业大学自然保护区学院,北京 100083
3 中国林业科学院研究院森林生态环境与保护所,国家林业局森林生态环境重点实验室,北京 100091
4 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要:大样地是监测森林生物多样性及生态因子动态变化的重要平台,以湖北木林子国家级自然保护区常绿落叶阔叶混交林为对象,依托 15 hm^2 动态监测样地,对每个 400 m^2 样方进行取样并测定 7 个化学性质指标,运用地统计与多元统计方法,分析了该大样地内不同土壤因子的富集程度、空间格局、变异性、相关性。结果如下:1)研究区土壤酸性较强,有机质、有效氮、全氮、有效钾丰富,有效磷、全磷亏缺;2)有效氮、全氮、有效磷呈东高西低,pH 呈西高东低,有效钾呈斑块状分布,有机质呈中间高,西北与东南低的"凸"型分布,其中以有效钾空间结构最复杂(A=50 m,D=1.96),pH 空间结构最简单(A=180 m,D=1.83);3)土壤因子的块基比范围为 0.14—0.69,14 对因子显著相关(P<0.05),其中以全磷的空间自相关最强,并与其余因子显著相关;4)土壤因子的变异系数范围为 0.05—0.34,其中全磷、有效磷变异系数最高,分别为 0.29 和 0.34,pH 变异系数最低(0.05),土壤全磷在主成分中具有最大载荷(2.27)。结果表明:1)木林子常绿落叶阔叶混交林土壤酸性较强,除了磷素亏缺,其余土壤养分富集;2)土壤的变异性不强,空间分布具有明显的自相关特征,并具有一定的尺度效应;3)除了土壤有效磷以外的土壤因子之间存在较为普遍的相互联系;4)土壤全磷对于土壤的综合变异最具代表性。

关键词:常绿落叶阔叶混交林;大型森林动态监测样地;土壤空间异质性;半方差分析;Moran's I 系数

Analysis of soil spatial variability in a subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in southwest Hubei Province

FENG Guang[1], YAO Lan[1,2,*], AI Xunru[1], HUANG Jihong[3,4], LU Xinghui[3,4], DING Yi[3,4], ZANG Runguo[3,4]
1 *School of Forestry and Horticulture, Hubei University for Nationalities, Enshi* 445000, *China*
2 *School of Natural Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*
3 *Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of the State Forestry Administration, Beijing* 100091, *China*
4 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*

Abstract: A large forest dynamics plot (FDP) is an important platform for monitoring dynamics of forest biodiversity and ecological factors. Research on soil spatial variability in large FDPs has aided in the elucidation of mechanisms of biodiversity maintenance in forests. In this study, we detected soil spatial variability in subtropical evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests in a 15-hm^2 FDP in Mulinzi National Natural Reserve, Hubei Province. Based on measurements of seven soil chemical properties, including AN, AP, AK, TN, TP, OM, and pH from each 400-m^2 subplot, we analyzed the spatial pattern, structure, variability, and correlation of soil factors by using geostatistics and multiple statistics. Our

基金项目:湖北省林学重点(特色)学科及楚天学者计划资助项目(2013XKJS_10517);湖北省教育厅重点资助项目(D20122901);湖北民族学院研究生学位论文培优基金资助项目(PY201507)
收稿日期:2015-12-08; **修订日期**:2016-06-06
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hbmyyl@163.com

results indicated that 1) The soil was low in pH and abundant in OM, TN, AN, and AK. However, AP and TP were insufficient. 2) Distribution patterns for soil factors fit semi-variogram analysis models with high R^2 values. Soil AN, TN, AP, and TP were generally higher in the eastern portion of the plot, whereas pH was higher in the western portion. OM was insufficient in northwestern and southeastern portions. The distribution pattern of AK was fragmented and patchy. Soil pH presented a simple spatial pattern with the longest semi-variogram range (180 m) and the lowest fractal dimension (1.83). In contrast, AK presented a complex spatial pattern with the shortest range (50 m) and the highest fractal dimension (1.96). 3) Significant correlations were found between 14 pairs of factors. TP was significantly correlated with all the others. Spatial autocorrelations were found in all factors. TP, with the lowest nugget-sill ratio (0.14), had strong spatial autocorrelation, which was primarily affected by structure factors. The other factors, with a ratio range from 0.32 to 0.69, exhibited moderate spatial autocorrelations, which were primarily affected by the joint effect of structure and stochastic factors. 4) The coefficient of variation (CV) ranged from 0.05 to 0.34. pH had the lowest CV (0.05), whereas AP and TP exhibited moderate variability and had the highest CV (0.34 and 0.29, respectively). We concluded that: 1) The soil was acidic and rich in nutrients, except for the lack of P; 2) The soil exhibited a significant distribution of autocorrelations and weak variation; 3) Overall, soil factors are correlated with each other, except for AP; and 4) TP was the most representative factor for overall soil variation.

Key Words: deciduous and evergreen broad-leaved mixed forest; forest dynamics plot; soil variability; semi-variogram analysis; moran's I

土壤是自然地理要素之一,成土过程既受其他自然地理要素(植被、地形、气候、母质)影响,也与人类生产活动有关,由于这些因素在空间分布上并不均匀,导致土壤也存在空间分布上的变异[1],即空间异质性。生态系统具有多个层次的结构与功能,因此土壤空间分布的影响机制复杂,在不同生态系统、不同的研究尺度中均可能存在差异。了解土壤的空间变异特征对于因地制宜改良生态系统经营模式具有重要作用,它已经成为生态学领域的研究热点[2-3]。近年来,结合描述性统计与地统计方法在国内开展的土壤空间变异研究的主要对象为人工林和农田等人工经营生态系统[4-5],而关于森林生态系统的相关研究则开展不多。

揭示土壤的空间变异特征及其影响因素对于理解森林生物多样性的维持机制具有重要意义。近年来我国已有学者基于大型森林动态监测样地开展了一系列植被特征方面的研究,主要包括物种分布格局和生物多样性等,然而在土壤空间异质性方面的研究却屈指可数[6],例如,郭晓伟等[7]依托 60 hm^2热带山地雨林样地的研究发现,不同深度的土壤有机碳含量因局部水热分配不均而具有显著差异;张俪文[8]依托 24 hm^2亚热带常绿阔叶林样地的研究发现,土壤全碳、全氮、全磷空间分布均主要受到海拔影响,且具有相似的分布格局;张娜等[9]依托 20 hm^2亚热带常绿阔叶林样地的研究发现,不同生境中土壤性质的变异性达到显著,凹凸度与海拔对土壤变异最具解释能力;范夫静等[10]依托 6 hm^2喀斯特植被样地的研究发现,多数土壤因子的空间分布规律相似。这些研究有助于深入认识亚热带、热带常绿阔叶林土壤的空间变异特征,然而还不能满足对亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤空间变异特征的认识,因而对此展开研究极为必要。

中亚热带山地植被以及亚热带低海拔基带至垂直高度 1800 m(秦岭南坡)区域的植被往往因适应低温环境而出现不同程度的落叶,从而形成亚热带常绿落叶阔叶混交林[11-12]。湖北西南部地区是华中地区最重要的天然林分布区之一,亚热带常绿落叶阔叶混交林是该地区最具代表性的森林类型,木林子国家级自然保护区是鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林保存最完好的地区之一。本文以亚热带常绿落叶阔叶混交林为对象,建立森林动态监测样地——湖北木林子 15 hm^2样地,结合地统计和多元统计方法分析该林区土壤因子的富集程度、空间格局、相关性与变异性等特征,以期为深入分析该森林的结构、动态与多样性维持机制奠定基础,为开展此类森林的生态系统经营提供科学依据。

1　研究地点

研究地点位于湖北木林子国家自然保护区,该保护区位于湖北省西南部恩施州鹤峰县境内,属武陵山脉东北端的石门支脉,地理坐标 29°55′59″—30°10′47″ N,109°59′30″—110°17′58″ E,海拔范围 1100—2095.6 m,保护区面积 20838 hm^2。该地区属中亚热带湿润季风气候,年均气温 15.5℃,绝对高温 39℃,绝对低温 -17.1℃,年均降水量 1700—1900 mm,年均相对湿度 82%,无霜期 270—279 d。代表性植被类型为亚热带常绿落叶阔叶混交林,分布在海拔 1300—1800 m 范围内,高海拔主要以落叶阔叶林为主。地带性土壤为黄壤,高海拔区域分布山地黄壤。成土母质为绿色砂页岩、紫色砂页岩和泥质页岩[13]。

2　研究方法

2.1　样地概况

样地建设于 2013 年 12 月至次年 1 月完成。在木林子国家级自然保护区的亚热带常绿落叶阔叶混交林内,按照热带林业科学中心(CTFS)的标准和技术规范[14],建立东西水平距离长 300 m、南北长 500 m 的 15 hm^2固定样地。采用实时动态测量仪(RTK)将 15 hm^2大样地划分为 375 个 20 m×20 m 的样方,样方 4 个角用水泥桩做永久标记。每个 20 m×20 m 的样方再细分为 4 个 10 m×10 m 和 16 个 5 m×5 m 的小样方。

样地的整体地势自东北角向西南角逐渐抬升,无明显断崖与尖(图 1)。在 20 m×20 m 样方水平上的海拔、坡度、凹凸度变化范围分别为 1583.4—1785.2 m、13.6°—39.6°、-17.4—14.4。样地内植被均为天然林,该区域在 20 世纪初期为附近居民主要的薪炭林区,曾遭受一定程度的人为干扰。样地内植被特征如下[15]:胸径≥1 cm 的木本植物 84189 株,分属于 57 科 118 属 237 种;群落物种组成中最主要的科为壳斗科(Fagaceae)和山茶科(Theaceae);样地内重要值排名前 10 位的物种依次为翅柃(*Eurya alata*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、川陕鹅耳枥(*Carpinus fargesiana*)、小叶青冈(*C.myrsinifolia*)、石灰花楸(*Sorbus folgneri*)、四照花(*Cornus kousa*)、锥栗(*Castanea henryi*)、白栎(*Quercus fabri*)、山矾(*Symplocos sumuntia*)、光亮山矾(*S.lucida*);上层乔木以小叶青冈和多脉青冈为主,中、下层的翅柃个体数量最多,达到 19667 株;样地内稀有种比例极高,有 116 种,占物种总数的 50.88%,个体数量仅占总个体数量的 0.14%;样地内的取样面积达到 6 hm^2时,1 cm 和 10 cm 径级的起测个体所包含的物种数均达到样地总物种数的 80%。重要值排名前 6 的物种空间分布格局如下[16]:翅柃主要分布在样地的中部和东部,而海拔较高的样地西部分布较少,多脉青冈、川陕鹅耳枥和小叶青冈几乎分布在整个样地,石灰花楸和四照花分布范围较广但样地东北部的山谷位置分布较少,均呈强烈的空间聚集格局。

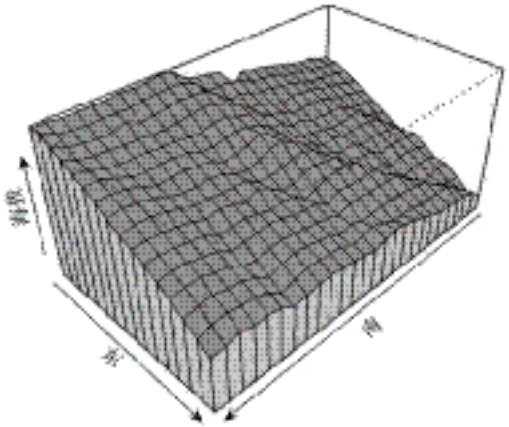

图 1　样地地形特征

Fig.1　The topographic characteristic of our plot

2.2　土壤取样与测定

土壤取样时间为 2014 年 8 月。由于森林空间异质性较强,考虑到平均水平和统计上的需要,采用对角线取样法进行样点布置,以每个 20 m×20 m 的样方为单位,在样方中心以及两个 10 m×10 m 小样方中心各取 1 钻,即每个样地钻取 3 个样本。森林土壤取样深度的确定应以植被因素为主要考虑,故选取表层 0—15 cm 土壤利用土钻取样,取样前移除凋落物与石砾。运用四分法将各个样地所钻取的 3 个样本筛选为 1 个最终样本,带回实验室经过自然风干、碾磨、过筛等预处理后进行土壤化学性质测定,方法如下[17]:土壤 pH 值用电位法测定,土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定,土壤有效氮含量用有效扩散法测定,有效磷含量用双酸法浸

提-钼锑抗比色法测定,有效钾含量用乙酸铵浸提-火焰光度法测定,全氮含量用半微量凯氏定氮法测定,全磷含量用硫酸-高氯酸消解法测定。

2.3 数据处理

本研究通过计算原始数据均值、方差、变异系数、峰度、偏度了解土壤因子的基本特征。为避免信息重叠造成统计误差,还使用偏相关分析控制协变量影响研究土壤因子间的真实相关性,并用主成分分析辨析各因子对土壤总体变异的贡献能力。除在描述性统计中使用土壤原始数据之外,其余统计过程中均使用经转化后满足正态分布的数据,利用 Shapiro-Wilk 法进行正态性检验。土壤因子的描述性统计、数据预转化、Shapiro-Wilk 正态性检验、偏相关分析及其显著性检测、主成分分析、克里格差值地图的绘制在 R(3.1.1)软件中的“ggm”、“multcomp”、“vegan”、“sgeostat”包中进行。

使用半方差分析和基于 Moran′s I 系数的空间自相关分析两种地统计方法对土壤空间变异特征进行研究,在 GS +(version 9.0)软件中完成。半方差分析是地统计学中研究因子空间变异的方法,用来表示区域化变量的空间依赖性,并能够利用函数拟合的方法准确地归纳变异特征,并可作为预测手段使用[18]。其公式如下:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum[Z_i-Z_{i+h}]^2$$

式中,$\gamma(h)$为滞后距离为 h 的半方差函数,$N(h)$为相距 h 的样点对数量,Z_i和 Z_{i+h}分别为区域化变量 Z 在位置 i 和 $i+h$ 处的实测值。该式滞后距离设定在不超过最大取样间隔的 1/2 内才有意义。块金值(C_0)、基台值(C_0+C)和变程(A)为半方差分析的重要参数。块金值表示变量在滞后距离很小时的变异程度,变程表示半方差达到基台值的样本间距,用来衡量空间自相关发生的范围。基台值为半方差值随滞后距离增加达到稳定时对应的值,是区域化变量总体特征的体现。块基比用来表示空间变异程度,若比例<25%,说明变量具有强烈的空间自相关性,在 25%—75%之间,变量具有中等的空间自相关; >75%时,变量具有微弱的空间自相关。分形维数(D)可以提供被研究对象空间格局的尺度及层次性和空间异质性在不同尺度间的相互关系等方面的信息。分形维数越小,空间格局的空间依赖性就越强,结构越好,空间格局相对简单。根据残差平方和(RSS)与回归系数(R^2)的大小判断模型拟合能力[19]。

此外,使用基于 Moran′s I 系数的空间自相关分析旨在进一步探究土壤因子空间分布的尺度效应。该系数旨在衡量邻面积单元上单元属性值的相似程度,是生态学研究中对于空间自相关变量的常用测度,其优势体现在对于自相关的正负关系能有所区分,并且研究尺度不同于半方差分析,并不受限于最大取样间隔的一半。其计算公式如下:

$$I(h)=N(h)\frac{\sum\sum Z_iZ_{i+h}}{\sum Z_i^{\ 2}}$$

式中,$I(h)$为滞后距离为 h 的自相关函数,其余参数含义同上。空间自相关分析中的 Moran′s I 系数大于 0 表示正的空间自相关,反映相似的属性在相邻区域存在空间聚集。该系数小于 0 表示负的空间自相关,反映差异性的属性在相邻区域存在空间聚集。该系数等于 0 表示无空间自相关,即变量在相邻区域随机分布。

3 结果

3.1 亚热带常绿落叶阔叶混交林大样地内土壤因子的基本特征

土壤因子的描述性统计参数如表 1 显示。土壤因子的变异系数介于 0.05 与 0.34 之间。pH 的变异系数最低(0.05),为弱度变异。全磷、有效磷变异系数最高(分别为 0.29 和 0.34),为中度变异。土壤有机质、全氮、全磷含量均值分别为 9.86%、6.26 g/kg、0.56 g/kg,土壤有效磷、有效钾、有效氮含量均值分别为 0.35、150.1、307.49 mg/kg,pH 均值为 4.33,酸性较强。

表 1　土壤因子的描述性统计特征

Table 1　The descriptive statistical characteristics of soil factors

因子 Factor	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	中位数 Median	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
pH	4.33	0.22	0.05	4.33	0.23	0.24
有机质 OM/%	9.86	1.89	0.19	9.75	0.46	-0.07
全氮 TN/(g/kg)	6.26	1.5	0.24	6.19	1.77	12.81
有效氮 AN/(mg/kg)	307.50	50.52	0.16	304.70	0.78	1.69
全磷 TP /(g/kg)	0.56	0.16	0.29	0.54	0.65	0.03
有效磷 AP/(mg/kg)	0.35	0.12	0.34	0.34	0.91	1.94
有效钾 AK/(mg/kg)	150.10	40.45	0.27	147.40	0.51	-0.34

OM: Organic matter; AK: Available K; TP: Total P; AN: Available N; TN: Total N; AP: Available P

3.2　亚热带常绿落叶阔叶混交林大样地内土壤因子的空间变异特征分析

3.2.1　大样地内不同土壤因子空间变化的半方差分析

半方差函数的拟合参数如表 2 所示。所有土壤因子的半方差函数拟合结果均具有高决定系数和低残差平方和。各土壤因子的变程如下:pH(180 m)>全磷(160 m)>有效氮(158 m)>全氮(118 m)>有机质(107 m)>有效磷(93 m)>有效钾(50 m)。土壤因子的块基比值范围为 0.14—0.69,全磷的块基比值最小,呈强烈空间自相关,其余因子均为中度空间自相关。各因子分维数大小顺序:有效钾(1.96)>有效磷(1.94)>有机质(1.93)>全氮(1.91)>有效氮(1.88)>全磷(1.84)>pH(1.83)。

表 2　土壤因子半方差函数参数模拟

Table 2　The semi-variogram models and parameters for soil factors

因子 Factor	转换 Transformation	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 A	块基比值 C_0/C_0+C	模型 Model	决定系数 R^2	残差平方和 RSS	分形维数 D
pH	①	0.001	0.003	180	0.32	Ⅰ	0.991	2.1×10^{-8}	1.83
有机质 OM	①	0.002	0.037	107	0.54	Ⅰ	0.945	6.4×10^{-6}	1.93
全氮 TN	①	0.032	0.063	118	0.50	Ⅰ	0.952	2.9×10^{-5}	1.91
有效氮 AN	①	0.014	0.030	158	0.46	Ⅰ	0.918	1.33×10^{-5}	1.88
全磷 TP	①	0.012	0.084	160	0.14	Ⅰ	0.965	7.6×10^{-5}	1.84
有效磷 AP	②	0.007	0.009	93	0.69	Ⅱ	0.680	2.2×10^{-6}	1.94
有效钾 AK	①	0.035	0.075	50	0.47	Ⅱ	0.982	1.02×10^{-5}	1.96

①: 自然对数 Natural logarithm; ②: 平方根 Square root; Ⅰ: 指数模型 Exponential model; Ⅱ: 高斯模型 Gaussian model

3.2.2　大样地内不同土壤因子的空间分布

样地内不同土壤因子的空间分布格局存在差异(图 2)。总体来说,土壤 pH 在样地内呈现西高东低,全氮、有效氮、有效磷含量东高西低,全磷含量西北角低,东南角高。有机质含量在样地西北与东南含量低。有效钾呈“岛”状分布,连续性差、破碎性高。所有土壤因子在样地中点以北 50 m 处与其东北区域土壤相似性高,却与其西北或东南区域的土壤差异性强。

3.2.3　大样地内不同土壤因子的空间自相关分析

基于 Moran′s I 系数的空间自相关分析显示(图 3),在 0—80 m 滞后距离内,所有土壤因子该系数随距离增加而大幅度降低, 各土壤因子的 Moran′s I 系数最大值均出现在短滞后距上,全磷该值最高(0.513)。在 80—170 m 滞后距离中,除了有效磷的该系数存在较大波动以外,其余土壤因子该系数均小幅降低或无明显变化。在 170 m 滞后距离外,全磷该系数随距离增加递减为负,有效钾的 Moran′s I 系数在 0 值附近稳定,其余因子该系数在 0 附近呈现先下降、再上升、再下降的小幅波动。各土壤因子 Moran′s I 系数虽然在一定滞后距离内均存在明显下降,然而数值接近于 0 时的滞后距离为:全磷(220 m)>有效氮(170 m)>pH(140 m)>全氮(110 m)>有机质(85 m)>有效磷(83 m)>有效钾(55 m)。

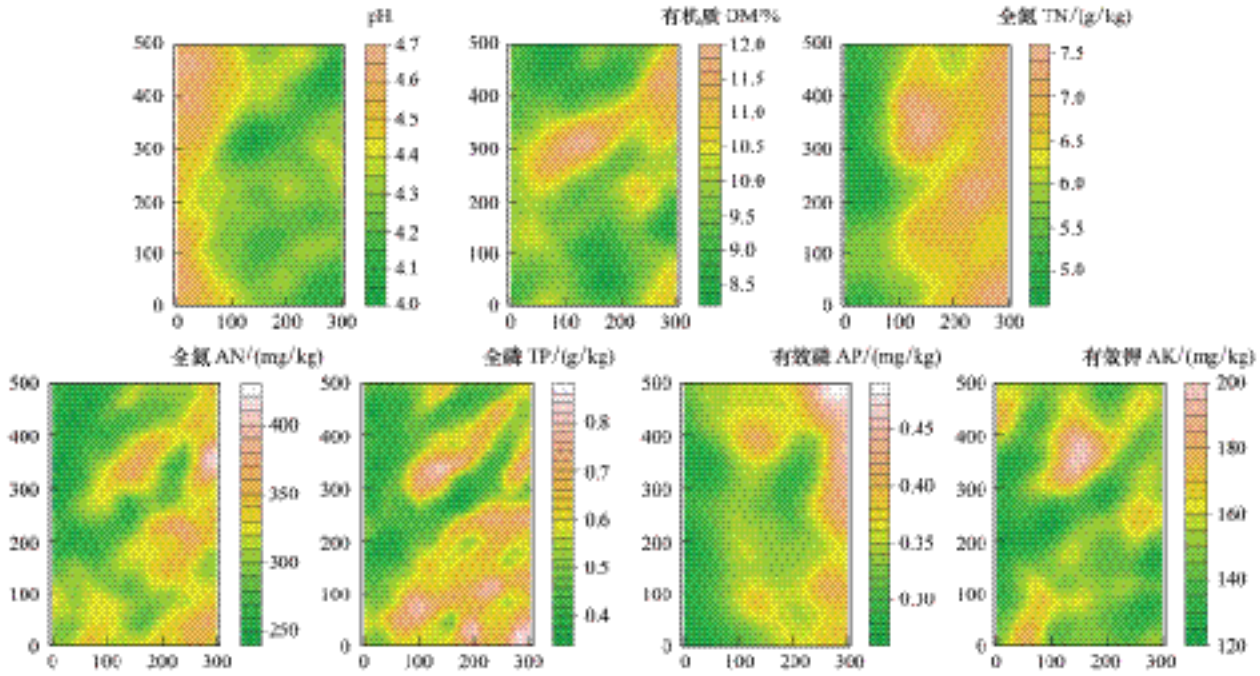

图 2 样地土壤因子空间分布地图

Fig.2 The spatial distribution maps of soil factors across our plot

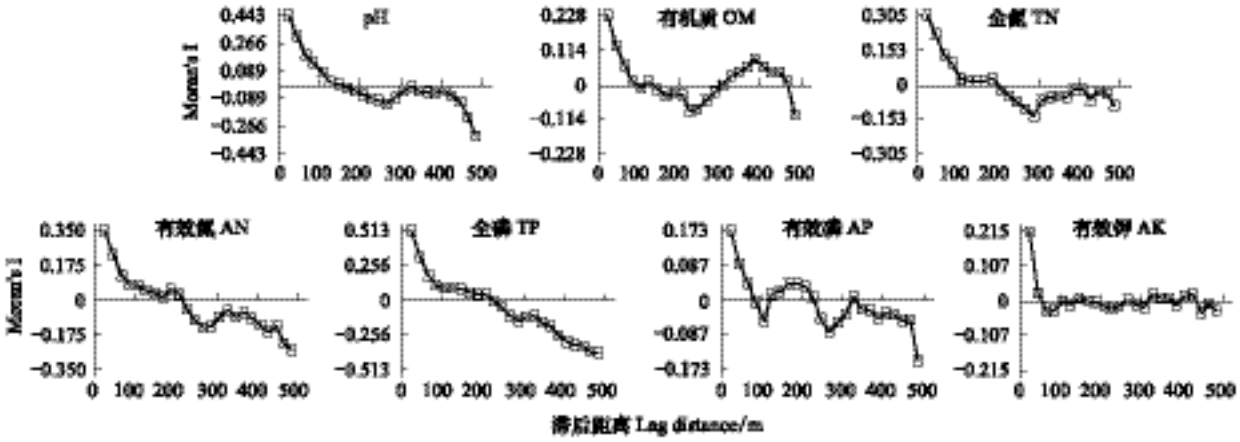

图 3 Moran′s I 空间自相关分析

Fig.3 The spatial autocorrelation analysis by Moran′s I

3.3 亚热带常绿落叶阔叶混交林大样地内土壤因子间的偏相关分析

大样地内不同土壤因子间的偏相关分析结果显示(图 4),14 对土壤因子之间的偏相关系数达到显著($P<0.05$)。土壤全磷与其余因子的偏相关系数均达到显著,与 pH、有机质存在显著负相关,与其余土壤因子存在显著正相关。而有效磷则仅与全磷存在显著正相关。除此之外,有效钾与有机质、pH,有效氮与 pH、全氮之间存在显著正相关,pH 还与有机质、全氮存在显著负相关,全氮与有机质存在显著正相关。

3.4 亚热带常绿落叶阔叶混交林大样地内土壤因子的主成分分析

主成分分析中,前 3 个主成分的特征根大于 1,共能代表 72.8% 的土壤变异(分别为 42.2%、16.0%、14.6%),可反映主要的土壤变异特征。土壤全磷、有效氮、全氮在第一主成分上载荷量最大(表 3),分别为 2.27、2.09、2.05,即第一主成分主要反映这三个因子的变化。土壤有效磷和 pH 在第二主成分上的载荷值最

大,分别为 1.50 和-1.47,即第二主成分主要反映这两个因子的变化。土壤有效磷在第三主成分上的载荷值最大 (1.70),说明第三主成分主要反映有效磷的变化。

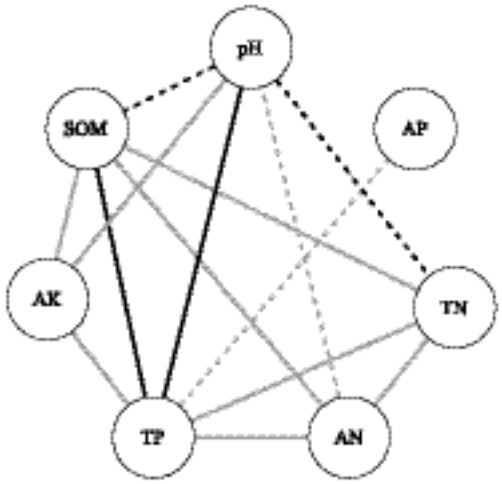

图 4　土壤因子偏相关分析

Fig.4　The partial correlation analysis of soil factors

图中灰色与黑色分别对应正相关与负相关,虚线与实线分别表示显著水平:$P<0.05$ 和 $P<0.01$

4　讨论与分析

4.1　土壤因子的基本特征

根据全国第二次土壤普查分类标准[20],鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林大样地内土壤有机质、全氮、有效氮平均含量达到一级(极丰富),有效钾含量达到二级(丰富),全磷均值属于五级(亏缺),有效磷属于六级(极亏缺)。研究区常绿落叶阔叶混交林土壤因子的基本特征与其他亚热带、热带季风森林有所不同。与广西常绿落叶阔叶混交林土壤相比[21],研究区土壤 pH 值、全磷、有效磷、有效氮含量均值低于广西木论常绿落叶阔叶混交林水平,有机质相似,全氮、有效钾相对更高。与海南热带山地雨林土壤相比[22],研究区土壤有效磷含量较低,pH 值相似,其余养分含量均较高。与浙江常绿阔叶林土壤相比[9],本研究区土壤 pH 值与其相似,全氮相对更高,全磷更低。总体来说,鄂西南亚热带常绿落叶阔叶混交林土壤酸性强,有机质、全氮、有效氮、有效钾丰富,而全磷、有效磷亏缺。

表 3　土壤因子主成分分析

Table 3　The principal component analysis of soil factors

因子 Factor	PC1	PC2	PC3	因子 Factor	PC1	PC2	PC3
pH	-0.30	**-0.47**	1.42	全磷 TP	**2.27**	0.50	0.23
有机质 OM	1.79	-0.27	-0.44	有效磷 AP	1.09	**1.50**	**1.70**
全氮 TN	**2.05**	0.16	-0.47	有效钾 AK	1.61	-0.10	1.02
有效氮 AN	2.09	-0.38	-0.16				

各主成分上高载荷的参数加粗

4.2　土壤因子的空间异质性

本文使用半方差拟合与基于 Moran′s I 系数的空间自相关分析对土壤的空间特征进行研究取得了良好的效果。半方差模型对土壤空间变异具有极高的拟合度,表明研究区土壤具有良好的空间结构。pH 具有最大的变程与最小的分形维数与变异系数,表明其空间格局简单,连续性强。该结果与广西及贵州常绿落叶阔叶混交林的同类研究相比具有相同点与不同点[21-23]:相同点在于均发现土壤 pH 的变异系数相对其他因子较低,不同点在于本文发现土壤 pH 的半方差变程最大,而广西与贵州同类森林中土壤 pH 较其他因子的半方差拟合的变程相对较小。上述相同之处表明,相比其余土壤因子,pH 不易受其他因素影响。有关研究表明[24],仅有少数高程因子对土壤 pH 分布存在影响,但是其他土壤因子受到高程因子、立地因子、土地利用方式等多个因素的耦合影响。上述不同点与喀斯特生态系统具有独特的二元水文结构及复杂的微生境有关,生态系统的结构与功能对土壤空间分布格局产生重要影响。土壤有效钾具有最小的变程与最大的分形维数,表明有效钾的空间格局复杂,在不同尺度下具有不同的格局,与天目山常绿阔叶林的有关研究发现一致[25]。半方差变程与 Moran′s I 正值区间相似,均显示全磷、有效氮、pH 在较大的空间范围内存在自相关,全氮、有机质、有效磷在中等的空间范围内存在自相关,有效钾在较小的空间范围内存在自相关。此外,根据 Moran′s I 系数的尺度效应特征以及半方差块基比值均可得出全磷变异主要受到结构因素影响,而其余因子还受随机因素影响,

与浙江天童常绿阔叶林的有关研究一致[9]。

影响土壤空间变异的结构因素为母质、气候、地形等自然地理要素,随机因素则为取样设计、测定误差与干扰等人为原因。有研究表明,气候与母质因素往往在大、中空间尺度中存在差异,地形是造成小尺度上土壤因子空间变异的根本结构因素[26-27]。微环境受局部地形条件支配,生态系统各组分之间的物质、能量再分配均与之关联。样地东侧的土壤养分较为富集,可能与地形条件有关。西侧处于上坡位的高地,东侧处于下坡位的洼地,降水冲刷使养分易随地表径流向地势低洼处积累。此外,样地内地势起伏较小,相邻区域相似的微生境造成土壤因子的分布普遍存在空间自相关,不同土壤因子的空间变异特征呈现出不同的尺度效应,说明土壤受到多种空间异质性不同的环境因子(如坡向、凹凸度、林冠郁闭度)的综合影响,具体机制还需进一步研究。此外,样地虽然设在保护区内,但保护区成立于 1995 年,该区域在 20 世纪初期曾遭受一定程度的人为采伐。生态系统虽然具备一定的自我调节功能,但人为干扰对于土壤性质的影响深远,受损的生态系统在恢复过程中极易受随机因素影响[28]。

4.3 土壤因子的相关性与变异性

土壤酸碱度与有机质是导致土壤其他特征变异的根本原因之一。土壤有机质与各养分因子的偏相关程度可以作为判断后者来源的依据。本研究中,土壤全氮、有效氮、有效钾均与有机质呈显著正相关,说明有机质分解是以上养分的主要来源之一。土壤全磷、有效磷与有机质并无显著正相关,这说明本研究区土壤磷元素多以无机态存在,可能主要来源于土壤母质,其富集程度受母质类型与成土作用影响。此外,除了有效磷,其余土壤因子均与 pH 显著相关,而 pH 的变异程度最弱,可能是土壤养分的转化与释放等多个过程对 pH 变化具有敏感的响应。

主成分为少量互不相关却能反映主要变异特征的综合变量,本文发现两个主成分均主要反映土壤有效磷的变异特征,反映其复杂的影响因素。由于全磷在第一主成分上载荷量最大,全磷是唯一与其余因子偏相关均为显著的土壤因子,此外,土壤磷元素亏缺,可能是植物生长发育的限制因子。综上所述,可以认为全磷对于研究区土壤的综合变异最具代表性。

5 结论

湖北木林子常绿落叶阔叶混交林土壤酸性较强,除了磷素亏缺外其余养分富集程度高;土壤的整体变异不强烈,空间分布具有明显的自相关特征;除了土壤有效磷以外,其余的土壤因子之间存在较为普遍的相互联系;土壤全磷对于土壤的综合变异最具代表性。

参考文献(References):

[1] Lin H S, Wheeler D, Bell J, Wilding L. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 271-290.

[2] Parker S S, Seabloom E W, Schimel J P. Grassland community composition drives small-scale spatial patterns in soil properties and processes. Geoderma, 2012, 170: 269-279.

[3] Turrión M B, López O, Lafuente F, Mulas R, Ruipérez C, Puyo A. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. Science of the Total Environment, 2007, 378(1/2): 195-198.

[4] Umali B P, Oliver D P, Forrester S, Chittleborough D J, Hutson J L, Kookana R S, Ostendorf B. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. Catena, 2012, 93: 38-48.

[5] Jackson R D, Bell M M, Gratton C. Assessing ecosystem variance at different scales to generalize about pasture management in southern Wisconsin. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 122(4): 471-478.

[6] 李旭, 王海燕, 丁国栋, 刘玲, 任丽娜, 杨晓娟. 华北土石山区森林土壤养分空间变异研究. 干旱区资源与环境, 2014, 28(6): 136-142.

[7] 郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 许涵, 陈德祥, 林明献, 周璋, 杨怀. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7878-7886.

[8] 张俪文. 环境空间异质性对物种空间分布和群落结构的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

[9] 张娜, 王希华, 郑泽梅, 马遵平, 杨庆松, 方晓峰, 谢玉彬. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系. 应用生态学报,

2012, 23(9): 2361-2369.

[10] 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎, 鹿士杨, 时伟伟, 谭秋锦. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(1): 92-98.

[11] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980: 279-282.

[12] 黄永涛, 姚兰, 艾训儒, 吕世安, 丁易. 鄂西南两个自然保护区亚热带常绿落叶阔叶混交林类型及其常绿和落叶物种组成结构分析. 植物生态学报, 2015, 39(10): 990-002.

[13] 葛继稳, 胡鸿兴, 李博. 湖北木林子自然保护区森林生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 2009.

[14] Condit R. Tropical forest census plots: methods and results from Barro Colorado Island, Panama and a comparison with other plots. Berlin: Springer Science & Business Media, 1998.

[15] 姚兰, 崔国发, 易咏梅, 黄永涛, 冯广, 刘峻城, 艾训儒. 湖北木林子保护区大样地的木本植物多样性. 林业科学, 2016, 52(1): 1-9.

[16] 姚兰. 湖北木林子保护区 15 hm^2大样地森林群落结构及多样性[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[18] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma, 1999, 89(1/2): 1-45.

[19] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 1986, 38: 45-94.

[20] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[21] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 覃文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.

[22] 许涵, 李意德, 骆土寿. 海南尖峰岭热带山地雨林——群落特征、树种及其分布格局. 北京: 中国林业出版社, 2015.

[23] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.

[24] 张伟, 陈洪松, 王克林, 苏以荣, 张继光, 易爱军. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.

[25] 杜华强, 汤孟平, 崔瑞蕊. 天目山常绿阔叶林土壤养分的空间异质性. 浙江农林大学学报, 2011, 28(4): 562-568.

[26] Tateno R, Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor. Ecological Research, 2003, 18(5): 559-571.

[27] Schwanghart W, Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography-a case study from south-eastern Spain. Geomorphology, 2011, 126(1/2): 252-263.

[28] Grieve I C. Human impacts on soil properties and their implications for the sensitivity of soil systems in Scotland. Catena, 2001, 42(2/4): 361-374.