

关帝山不同植被恢复类型土壤碳氮的空间变异性

武江星, 严俊霞, 李洪建

(山西大学 黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要:以关帝山 2 种不同植被恢复措施的林地[人工种植的华北落叶松林(LYS)和自然演替的针阔混交林(ZKHJ)]为研究对象,分析了不同植被恢复类型土壤全碳与全氮的空间变异性及其与环境因子的关系,并计算了各变量在不同置信水平与估计精度下的最佳采样数量。结果表明:① 2 种植被恢复类型土壤全碳和全氮含量差异显著,ZKHJ 土壤全碳和全氮含量比 LYS 的分别高 1.00% 和 0.07%;ZKHJ 土壤全碳和全氮的空间变异系数比 LYS 的分别高 17.22% 和 7.70%。② 土壤水分对 2 种植被类型土壤全碳和全氮空间分布的影响大于土壤温度的影响。③ 2 种植被类型土壤全碳和全氮都具有较强的空间自相关性,随机因素引起的异质性较小,空间异质性的变化主要由结构因素引起的。④ 在同一置信水平和估计精度下,ZKHJ 需要的必要采样数量比 LYS 的多;随着置信水平和估计精度的减低,2 种植被恢复类型的合理取样数目逐渐减少。

关键词:植被恢复类型;土壤全碳和全氮;空间变异;关帝山;山西省

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0042-05

Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and Nitrogen in Different Vegetation Restoration Types in the Guandi Mountain Area of Shanxi Province

WU Jiangxing, YAN Junxia, LI Hongjian

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Taking two different vegetation types [one man-planted *larix principis-rupprechtii* forest (LYS) and one natural succession coniferous and broadleaf mixed forest (ZKHJ)] as research sites, we analyzed heterogeneity of total carbon (C), total nitrogen (N) of the soil in the two forests, and influencing factors on their heterogeneity. At the same time, we calculated the minimum sampling number of all the variables in different confidence levels and under the responding estimation accuracy. The results showed that: ① significant difference of the C and N in the two vegetation restoration types existed, contents of both the C and N in ZKHJ forest was 1.00% and 0.07% higher than those in LYS forest, and spatial variation coefficients of the C and N in the ZKHJ were 17.22% and 7.70% higher than those in the LYS forest; ② impact of soil water content on spatial distribution of C and N in both forest was higher than soil temperature; ③ the C and N in the both forests showed a strong autocorrelation, and stochastic factors had little effect on spatial heterogeneity of C and N, and most changes of spatial heterogeneity resulted from structural factors; ④ at the same confidence interval and same estimation accuracy, the minimum sampling number was higher for ZKHJ forest than that for LYS forest; the sampling number of both the C and N for both the forest increased with the decrease of estimation accuracy.

Keywords: vegetation restoration type; soil total carbon and total nitrogen; spatial heterogeneity; Guandi Mountain area; Shanxi Province

空间异质性是指生态学过程和格局在空间分布上的差异性和复杂性。近年来,空间异质性问题受到生态学家们的广泛关注。土壤空间异质性受随机性因素(取样、测量误差)和结构性因素(地形、母质、植被类型

等)的共同影响,是异质性研究的一个重要领域,国内外已有大量研究报道^[1-2]。土壤碳氮含量是反映土壤肥力的重要指标,揭示土壤碳氮含量的空间变异规律是实现土壤可持续利用和区域可持续发展的前提。近

年来,许多研究表明,土壤有机质和全氮含量在不同尺度上都存在明显的空间异质性,属于中等变异,并具有明显的空间自相关性。二者的空间分布格局基本一致,空间变异主要由结构性因素引起的^[3-5]。也有部分学者对影响土壤有机质和全氮含量空间分布格局的因子进行了分析,指出土壤类型、地形、地貌、植被类型及人为活动等因素对空间变异的影响^[6-8]。

黄土高原地区地处半干旱半湿润气候带,自然植被破坏严重,土壤贫瘠且结构疏松,水土流失严重,是我国主要的生态环境脆弱地区之一,也是国家以退耕还林还草为核心的生态恢复建设工程的重点实施区域。对黄土高原的退耕地进行植被恢复和重建,对提高土地生产力、减缓水土流失、改善生态环境有着重要的实践意义。迄今为止,不同植被恢复类型土壤全碳和全氮含量差异的研究已经有很多^[9-14],而对不同植被恢复类型空间变异性特征的研究鲜有报道。本文采用传统统计分析和地统计学分析方法,以退耕后人工种植的华北落叶松林和自然演替而成的针阔混交林为研究对象,探讨不同植被恢复类型土壤全碳和全氮的空间分布特征及其与环境因子的关系,以期对黄土高原地区退耕地的植被恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西省庞泉沟国家自然保护区内进行。区内属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 3~4℃,年均降水量 830.8 mm,多集中在 7 月、8 月,无霜期 100~130 d,保护区自然概况详见文献^[15]。试验地位于庞泉沟自然保护区试验区的八道沟口,本研究选取农田弃耕后人工种植的华北落叶松林(LYS)和天然次生的针阔混交林(ZKHJ)2种植被类型,各样地的植被、土壤、地形情况等详见文献^[15-16]。

1.2 研究方法

在华北落叶松人工林、针阔混交林地中分别选取面积为 20 m×20 m,20 m×16 m 的区域作为供试区域,在样地内均采用分级网格嵌套法布置测定点,2个样地分别布设 108 个和 102 个取样点,取样点的详细设计见文献^[15-16]。

用 LI-6400 的土壤温度探针测定 5 cm(T_5)、10 cm(T_{10})和 15 cm(T_{15})深度的土壤温度值。0—10 cm 深度的土壤含水量(W_s)采用烘干法测定。用土钻取 0—10 cm 深度的土壤装入封口袋内,所取土样部分用于测定土壤水分(105℃烘干),部分自然风干,过 2 mm 土壤筛,使用 vario MACRO cube 元素分析仪(德国)测定土壤全氮(N)和全碳(C)。碳氮比(C/N)=C/N。

1.3 数据处理与统计

1.3.1 经典统计 采用单样本柯尔莫哥洛夫—斯米洛夫(One-sample Kolomogorov-Semirnov, K-S)检验数据是否符合正态分布,检验时取显著性水平 $\alpha=0.05$ 。采用 Pearson 相关分析法分析环境因子与土壤全碳、全氮的相关关系。采用两独立样本 t 检验分析两个样地土壤全碳、土壤全氮均值是否存在显著差异。上述分析均利用 SPSS 17.0 软件进行。

采用以下公式确定土壤样本容量:

$$n=(T \cdot CV)^2/k^2 \quad (1)$$

式中: n ——合理的样本容量; T ——与显著性水平相对应的 t 分布的双侧分位数; CV ——样本变异系数; k ——试验允许的误差^[17]。

1.3.2 地统计分析 用 GS+9.0(Gamma Design Software, Inc.)进行半方差函数模型拟合和参数计算。利用 Surfer 8.0(Golden Software, Inc.)进行克里金(Kriging)插值,绘制各指标空间分布的等值线图。

2 结果与分析

2.1 传统统计分析

2.1.1 常规统计分析 传统统计分析表明,ZKHJ 土壤全碳、全氮含量都比 LYS 的高,分别为 2.27%,0.17%和 1.27%和 0.10%(表 1)。独立样本 t 检验表明,2种植被类型土壤全碳和全氮的均值差异显著。除 ZKHJ 土壤 C/N 比属于弱变异外,2种植被类型土壤全碳和全氮及其环境因子的空间变异均属于中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$)。ZKHJ 土壤全碳、全氮和土壤水分的空间变异系数都大于 LYS 的,分别为 37.07%,30.01%,22.56%和 19.85%,22.31%,13.34%;2种植被类型 5,10,15 cm 深度的土壤温度的空间变异系数相差不大,为 11%~16%。对数据进行 K-S 检验结果表明,除 LYS 样地的 T_{15} ,C,N 和 C/N 比对数转换后符合正态分布($P_{K-S} < 0.05$)外,其他指标均符合正态分布($P_{K-S} > 0.05$),数据满足平稳假设,不需要进行转换就可以进行地统计学分析。

2.1.2 简单相关分析 简单相关分析表明,ZKHJ 和 LYS 土壤全碳和全氮的相关系数分别为 0.79,0.98,相关性达到了极显著水平($p=0.00$)。ZKHJ 和 LYS 土壤全碳和全氮含量与 W_s 存在极显著的线性正相关关系($p < 0.01$),相关系数分别为 0.61,0.59,0.31,0.21。ZKHJ 土壤全碳和全氮与 T_5 , T_{10} 和 T_{15} 存在显著的线性负相关关系($p < 0.01$);除 LYS 土壤全氮与 T_5 存在极显著的线性负相关关系外($p < 0.01$),其土壤全碳和全氮与 3 种不同深度的温度都相关不显著($p > 0.05$) (表 2)。表明土壤水分对 2种植被类型的土壤全碳和全

氮空间分布的影响要远大于土壤温度的影响。

2.2 空间变异特征分析

2.2.1 半方差函数分析 利用 LYS 土壤全碳和全氮的测定数据,ZKHJ 土壤全碳和全氮则利用对数转换后的数据进行半方差函数分析。结果表明(表 3), ZKHJ 土壤全碳和全氮的理论模型为线性模型,而 LYS 土壤全碳和全氮的理论模型分别为指数和球形模型,表明 ZKHJ 土壤全碳和全氮含量呈随机分布,而 LYS 的则呈聚集分布。2 种植被类型土壤全碳和全氮的块金值/基台值都 $\leq 25\%$,表明他们具有较强的空间自相关性,随机因素引起的异质性较小,空间异质性的变化主要由结构因素如气候、地形和土壤成土母质等自然因素引起的。ZKHJ 土壤全碳和全氮的变程都为 17.35 m,大于 LYS 的(9.06 m,7.80 m),表明影响 2 种植被类型土壤全碳和全氮空间分布的生态过程尺度不同。

表 2 土壤全碳、全氮与环境因子的相关系数							
样地	指标	C	N	W _s	T ₅	T ₁₀	T ₁₅
ZKHJ	C	1	0.79**	0.61**	-0.27*	-0.24*	-0.26*
	N	0.79**	1	0.59**	-0.25*	-0.22*	-0.24*
LYS	C	1	0.98**	0.31**	-0.01	-0.09	-0.14
	N	0.98**	1	0.21**	-0.30**	-0.11	0.14

* 相关性在 0.05 的显著水平; ** 相关性在 0.01 的显著水平。

表 3 土壤全碳、全氮的变异函数模型及其参数								
样地	土壤指标	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数	离差平方和
ZKHJ	C	线性	0.27	1.27	0.21	17.35	0.95	0.04
	N	线性	0.001	0.004	0.25	17.35	0.96	3.67 E-07
LYS	C	指数	0.0001	0.05	0.002	9.06	0.96	2.36 E-06
	N	球形	0.003	0.05	0.06	7.80	0.99	8.64 E-09

2.2.2 空间分布格局 基于 Kriging 插值法得到 2 个研究样地土壤性质各指标的空间分布格局(图 1)。与 ZKHJ 相比,LYS 土壤水分、土壤全碳和全氮含量的变异范围较小、空间分布模式简单。同一种植被类型,土壤全碳和全氮含量的分布模式极为相似,表明二者的空间关联性较好。LYS 土壤全碳和全氮呈条带状分布,低值区位于测定区域的南部,高值区位于测定区域的西北角;ZKHJ 土壤全碳和全氮呈斑块状分布,南部区域低、北部区域高。

2.3 合理采样数目的确定

在同一置信水平和估计精度下,ZKHJ 需要的必要采样数量比 LYS 的多,在 95%置信水平 90%的估计精度下,ZKHJ 和 LYS 土壤全碳和全氮的必要采样数量分别为 53,33,15,19(表 4)。在同一置信水平下,合理采样数目随着估计精度的降低而大幅度减少。

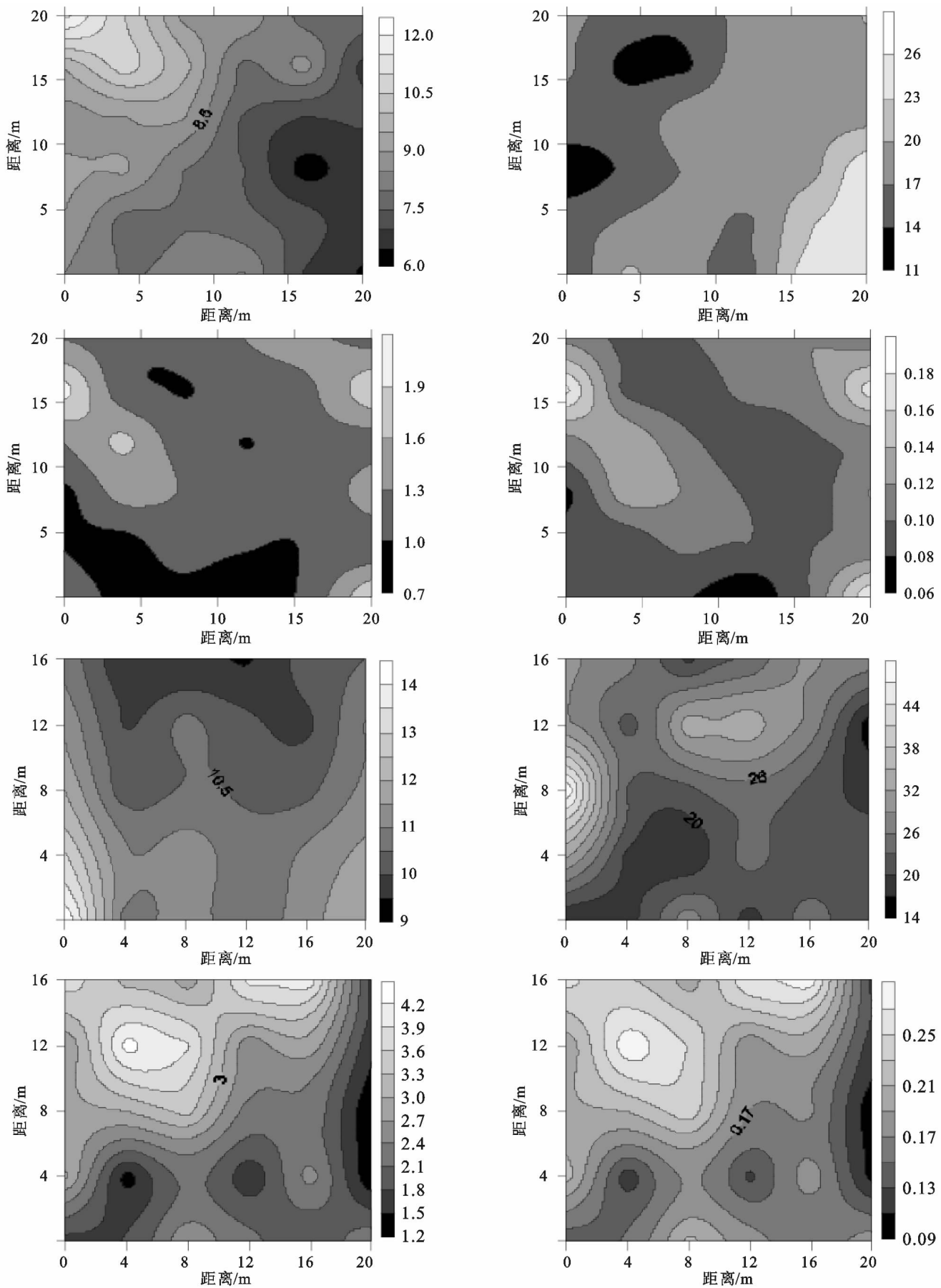
3 讨论

植被能够改善土壤肥力,不同植被类型土壤养分

表 1 土壤全碳和全氮及其影响因子的描述统计分析							
土壤	指标	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布型
ZKHJ	T ₅ /℃	12.37	1.60	12.93	0.71	0.29	正态
	T ₁₀ /℃	11.87	1.61	13.56	0.88	0.76	正态
	T ₁₅ /℃	11.29	1.50	13.29	1.05	1.98	正态
	W _s /%	23.14	5.22	22.56	1.85	6.97	正态
	C/%	2.27	0.84	37.07	0.94	0.74	正态
	N/%	0.17	0.05	30.01	2.94	16.24	正态
	C/N	12.88	1.17	9.08	0.68	0.31	正态
	T ₅ /℃	8.27	1.12	13.53	0.45	1.92	正态
	T ₁₀ /℃	8.06	0.93	11.57	0.89	2.98	正态
	T ₁₅ /℃	7.95	1.24	15.53	1.45	3.16	非正态
LYS	W _s /%	19.01	2.54	13.34	0.24	1.44	正态
	C/%	1.27	0.25	19.85	0.82	0.78	非正态
	N/%	0.10	0.02	22.31	1.66	4.10	非正态
	C/N	12.66	1.87	14.77	0.25	-0.21	非正态

注:表中 T₅,T₁₀,T₁₅,W_s,C,N 和 C/N 比分别代表 5 cm,10 cm,15 cm 深度的土壤温度(℃)、土壤水分(%),土壤全碳(%),全氮(%) and 全碳/全氮。

含量不同^[10-11,18]。农田退耕还林还草后,每年都有大量的枯枝落叶进入土壤,经微生物分解后形成腐殖质,使得土壤有机碳增加,并将大气中的氮素固定到土壤中,使土壤肥力不断提高。本研究中,针阔混交林土壤全碳和全氮含量比落叶松人工林的分别高 1.00%和 0.07%,天然恢复的针阔混交林更有利于土壤碳氮积累。华北落叶松林属于针叶林,群落结构简单,植被类型单一,林下无草本植物或灌木,凋落物少且不易分解,因此土壤碳氮含量低。而自然恢复的针阔叶混交林群落结构复杂,植被类型多样(林种以云杉+华北落叶松+桦树为主,林下植物有披针苔草、中亚苔草等),根系生物量大,大量凋落物和根系腐烂物为土壤提供了充足的养分,土壤碳氮含量高,这与前人研究结果相一致^[9,11]。如王凯博等^[9]研究表明,天然灌木林和天然草地土壤养分含量明显高于人工植被类型;并且人工灌木林土壤养分含量高于人工乔木林。马玉红等^[11]指出在黄土高原丘陵沟壑区,天然恢复植被较人工植被有机碳氮积累速度快,潜力大。



注:从左至右第一、二行分别为 LYS 和 ZKHJ 的 T_{10} , W_s , C , N 。

图 1 土壤温度、土壤水分、土壤全碳和土壤全氮空间分布

表4 不同置信水平与估计精度下必要采样数量

植被 类型	指标	95%置信水平			90%置信水平		
		估计精度			估计精度		
		95%	90%	85%	95%	90%	85%
ZKHJ	C	210	53	23	148	37	16
	N	132	33	14	93	23	10
LYS	C	61	15	7	43	11	5
	N	76	19	8	54	13	6

土壤理化性质的空间变异性是植被、地形、气候、土壤母质、外界干扰及其他随机性因素共同作用的结果^[2,19-20]。有报道指出随温度的增加和降水的降低,土壤有机碳和全氮蓄积量呈减少趋势^[7]。本研究中,2种植被恢复类型土壤全碳和全氮含量与 W_0 存在极显著的线性正相关关系,可能是因为土壤含水量高的样点,地上植被和根系生物量也较多,枯落物和根系分解速率较快,有利于土壤碳氮的积累。针阔混交林土壤全碳和全氮与 T_5 、 T_{10} 和 T_{15} 存在显著的线性负相关关系,原因可能是土壤温度高的地方,也是地上枯落物分解快、土壤有机质矿化和氮矿化速率快的地方,因此积累的有机质和氮较少,这与前人的研究结论相吻合^[2,19]。刘伟等^[2]报道了黄土高原草地0—40 cm土壤有机碳含量与土壤含水量呈显著正相关,与年均温呈极显著负相关。张娜等^[19]研究表明天童常绿阔叶林土壤全碳和全氮的空间异质性与海拔呈正相关,高海拔沟谷样方的土壤全碳含量最高,可能是高海拔沟谷样方土壤易积水,形成厌氧环境,且平均气温略低于低海拔地区,土壤有机碳分解速率减慢,有利于土壤有机质的积累。虽然土壤温度和土壤水分可在一定程度上解释2种植被类型土壤全碳和全氮含量的空间变异,但还有一部分空间变异未被解释,表明还有其他因子影响土壤性质各指标的空间变异,如根系生物量、凋落物量、林窗、微地形以及空间因子等均会不同程度地影响土壤性质,有待进一步研究。

本研究中,针阔混交林在17.35 m范围内土壤全碳和全氮具有强烈的空间自相关性,结构性因子分别引起了79%和75%的空间变异;而落叶松人工林土壤全碳和全氮分别在9.06 m和7.80 m范围内具有强烈的空间自相关性,结构性因子分别引起了99.8%和94%的空间变异,表明2个样地土壤全碳和全氮的空间变异主要受地形、土壤母质、气候等自然因素的影响。张亚茹等^[3]研究表明鼎湖山季风常绿阔叶林在17.4 m和46.20 m小尺度范围内,结构性因子分别能解释土壤有机碳和全氮含量空间变异93.6%和53.7%。张娜等^[19]指出天童常绿阔叶林土壤全碳和全氮在81.6 m范围内具有中等程度的空间自相关,是结构性因素和随机性因素共同作用的结

果。本研究中,落叶松人工林土壤全碳和全氮的空间自相关性比针阔混交林高,空间变异程度比针阔混交林低,空间格局分布也表现为更为连续的空间分布特征,反映了该样地土壤全碳和全氮具有较强的稳定性,其原因可能是针阔混交林内植被类型分布不均匀引起的,这一结果与张娜等^[19]的研究结果相一致。

4 结论

(1) 2种植被恢复方式的土壤全碳和全氮含量的均值存在显著的差异,ZKHJ土壤全碳和全氮含量比LYS的分别高1%和0.07%;ZKHJ土壤全碳和全氮的空间变异系数比LYS的分别高17.22%和7.70%。

(2) 土壤水分对2种植被类型土壤全碳和全氮空间分布的影响大于土壤温度的影响。

(3) 2种植被类型土壤全碳和全氮都具有较强的空间自相关性,随机因素引起的异质性较小,空间异质性的变化主要由结构因素引起的。2种植被类型土壤全碳和全氮含量的变程不同,表明影响2种植被类型土壤全碳和全氮空间分布的生态过程尺度不同。

(4) 在同一置信水平和估计精度下,ZKHJ需要的必要采样数量大于LYS的取样数量。

参考文献:

- [1] Lin H, Wheeler D, Bell J, et al. Assessment of Soil Spatial Variability at Multiple Scales [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3)/(4): 271-290.
- [2] 刘伟,程积民,高阳,等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1): 68-76.
- [3] 张亚茹,欧阳旭,褚国伟,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 19-23.
- [4] 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.
- [5] Wang Y, Fu B, Lü Y, et al. Local-Scale Spatial Variability of Soil Organic Carbon and its Stock in the Hilly Area of the Loess Plateau, China [J]. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 70-76.
- [6] 张伟,刘淑娟,叶莹莹,等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 93-101.
- [7] 高安社,郑淑华,赵萌莉,等. 不同草原类型土壤有机碳和全氮的差异[J]. *中国草地*, 2005, 27(6): 44-48, 63.
- [8] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Stocks as Affected by Topographic Aspect and Vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia [J]. *Geoderma*, 2006, 135: 335-344.
- [9] 王凯博,时伟宇,上官周平. 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.

4 结论

(1) 枯落物重量在不同密度林分中的重量也是不同的,变化趋势是随着密度的增加而增大。密度 2 100 株/hm² 的林分枯落物的重量是密度 50 株/hm² 的 1.75 倍;枯落物最大持水量处于自身重量的 2~4 倍,最大持水率在 250.61%~310.66%;有效拦蓄量也随密度的增加而增加。

(2) 随着密度的增加土壤的最大持水量先是增加后减小,在 1 800 株/hm² 达到了最大值为 2 868.0 t/hm²;毛管孔隙度与毛管蓄水量没有明显的规律,非毛管孔隙度与非毛管蓄水量所呈现的变化趋势与土壤的最大持水量是一样的。就总孔隙度而言,处于 43.6%~47.8%,没有明显的规律可言。

(3) 随密度的增加油松的水源涵养指数是呈现增加趋势的,其中的最大值是最小值的 1.35 倍,当密度处于 1 500 株/hm² 时,指数趋于稳定,在 1 500~1 800 株/hm² 时水源涵养指数较高,在 1 530 株/hm² 时达到最大值。

参考文献:

- [1] 于志明,王礼先. 水源涵养林效益研究[M]. 北京:中国林业出版社,1991.
- [2] 王雄宾,余新晓. 华北土石山区油松林生态系统健康评

价[J]. 中国水土保持科学,2009,7(1):97-102.

- [3] 张振明,余新晓,牛健植,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持报,2006,19(3):139-143.
- [4] 徐娟,余新晓. 北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报,2009,23(3):189-193.
- [5] 刘世荣,温远光,王兵,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
- [6] 韩同吉,裴胜民,张光灿,等. 北方石质山区典型林分枯落物层涵蓄水分特征[J]. 山东农业大学学报,2005,36(2):275-278.
- [7] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [8] 田育新,李锡泉,吴建平,等. 小流域森林生态系统林地土壤渗透性能研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4):173-175.
- [9] 徐学华,于树峰,崔立志,等. 冀北山地华北落叶松人工林水源涵养功能分析[J]. 水土保持研究,2009,16(5):162-165.
- [10] 黄进,张金池,淘宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):182-186.
- [11] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [12] 陈波,孟成生,赵耀新,等. 冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2012,26(3):1-6.
- [15] 严俊霞,李洪建,李君剑,等. 山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性[J]. 环境科学,2015,36(5):1793-1801.
- [16] 严俊霞,李洪建,李君剑. 庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间异质性[J]. 生态学报,2015,35(24):1-10.
- [17] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration[J]. Forest Ecology and Management,2008,255(1):106-112.
- [18] 丁文广,魏靓丽,牛贺文. 西北干旱区植被恢复的土壤养分效应[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2568-2573.
- [19] 张娜,王希华,郑泽梅,等. 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[J]. 应用生态学报,2012,23(9):2361-2369.
- [20] 孙文义,郭胜利. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 生态学报,2011,31(6):1604-1616.

(上接第 46 页)

- [10] 董扬红,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):143-148.
- [11] 马玉红,郭胜利,杨雨林,等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报,2007,22(1):97-105.
- [12] 栗妍,魏玮,邱扬等. 黄土丘陵小流域植被恢复驱动下的土壤养分特征[J]. 水土保持研究,2014,21(6):115-121,128.
- [13] 邱莉萍,张兴昌. 黄土高原沟壑区小流域不同植被覆被对土壤性质的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(3):64-68.
- [14] Fu X, Shao M, Wei X, et al. Soil Organic Carbon and Total Nitrogen as Affected by Vegetation Types in Northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2010,155(1)/(2):31-35.