

林地开垦对黄土区坡面土壤养分空间分布的影响

王昭^{1,2}, 孔维波³, 姚毓菲³, 鲍凯强^{1,2}, 王哲³, 魏孝荣^{1,3}, 邵明安^{1,3}

(1.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨陵 712100;

2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨陵 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨陵 712100)

摘要: 研究黄土高原侵蚀环境下林地开垦后坡面土壤养分空间分布状况,确立林地开垦后侵蚀驱动的坡面土壤养分空间变异特征。以黄土高原丘陵区子午岭林地和开垦28年的侵蚀坡面为研究对象,分析土壤主要性质和养分含量的变化情况,运用经典统计学和地统计法分析坡面土壤基本性质和养分空间分布规律。林地开垦后坡面土壤pH增加了0.24个单位,有机质、全氮、全磷和铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾分别降低了13.77,1.14,0.10 g/kg和6.05,1.63,4.99,58.44 mg/kg。林地的土壤有机质、全氮和全磷的变异系数大于开垦地,而pH和各速效养分的变异系数小于开垦地。开垦后中坡位和下坡位养分含量减少幅度较大,上坡位减少幅度较小。林地和开垦地的土壤各指标都呈中等或强烈的空间自相关。林地开垦增强了有机质、全氮、全磷、铵态氮、速效磷和速效钾的空间异质性,但减小了pH的空间异质性,地形等结构性因子主导了土壤养分空间异质性的形成。林地开垦后,pH、有机质、全氮和全磷变程增大,铵态氮、硝态氮和速效钾变程减小,速效磷在2个坡面上的变化趋势不一致。研究结果表明林地开垦极大地减少了坡面土壤养分含量,但减少幅度与坡位和坡面形态有关。同时,开垦增大了坡面土壤有机质、全氮和全磷的空间依赖性,减小了速效养分的空间依赖性。

关键词: 黄土高原; 林地开垦; 土壤养分; 空间变异; 空间自相关

中图分类号: S158.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0313-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.043

Effects of Forestland Reclamation on Soil Nutrients Spatial Distribution Along Slope in the Hilly Area of the Loess Plateau, China

WANG Zhao^{1,2}, KONG Weibo³, YAO Yufei³, BAO Kaiqiang^{1,2},

WANG Zhe³, WEI Xiaorong^{1,3}, SHAO Mingan^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.College of Natural Resources and Environment,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Institute of Soil and Water

Conservation, China Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: This study was aimed to investigate the distribution of soil nutrients along slope on the Loess Plateau and establish the spatial variation of soil nutrients driven by erosion after forestland reclamation. In this study, soils were collected in the Ziwuling forestland and forestland reclaimed for 28 years which was eroded, in the hilly area of the Loess Plateau. The spatial distributions of soil nutrients were analyzed with the methods of classical statistics and geostatistics. We found that the soil pH value increased by 0.24 units in the slopes after reclamation, while the soil organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonium nitrogen (NH_4^+), nitrate nitrogen (NO_3^-), available potassium (AP), available phosphorus (AK) decreased by 13.77, 1.14, 0.10 g/kg, and 6.05, 1.63, 4.99, 58.44 mg/kg, respectively. The variation coefficients of soil OM, TN and TP in the forest were greater than those in the forestland reclamation, while the opposite trend was found in the soil pH value. The changes of the nutrients in the middle slope and lower slope was larger, but was smaller in the upper slope after the forestland reclamation. The soil nutrients in the forest and the forestland reclamation had medium or strong spatial self-correlation. The spatial heterogeneity of OM, TN, TP, NH_4^+ , AP and AK in the forestland reclamation was increased, but the spatial heteroge-

收稿日期:2020-01-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41622105,41571296);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC039)

第一作者:王昭(1995-),女,在读硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail:wangzhao5526@163.com

通信作者:魏孝荣(1978-),男,研究员,博士生导师,主要从事生态系统物质循环研究。E-mail:xrwei78@163.com

neity of soil pH was decreased, mainly due to the structural factors, such as terrain, dominated the formation of soil nutrients space heterogeneity. After the reclamation of forestland, the effective range of pH, OM, TN and TP were increased, while NH_4^+ , NO_3^- and AK were decreased, and the variation of AP on the two slopes was inconsistent. Our results demonstrated that soil nutrients contents on the slope decreased in the forestland reclamation, but the changes in the nutrients were related to slope position and slope pattern. Moreover, the spatial dependence of OM, TN and TP increased, but decreased in the available nutrients after the forestland reclamation.

Keywords: the Loess Plateau; forestland reclamation; soil nutrients; space variation; spatial self-correlation

森林生态系统是陆地最为重要的生态系统之一,在涵养水源和调节地表水土过程中有着重要作用。近年来,由于土地资源的过度开发,林地开垦规模逐年增大。联合国粮农组织最新森林资源评估结果^[1],全球森林总面积在 1990—2015 年下降了 3%,热带地区森林面积以 $5.5 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$ 的速度下降。在 21 世纪初,南亚和东南亚因林地开垦造成森林面积减少了 $6.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,并且仍以每年 2% 的速度下降^[2]。这些砍伐和开垦,对全球陆地生态系统及其对全球变化的应对产生深刻和长远的影响,是目前人类面临的最为严重的生态环境问题之一。

森林开垦不但使森林生态系统丧失了其原有的功能,而且造成了土壤流失,改变了土壤性质的空间分布规律,造成了土壤性质的恶化,成为全球土壤退化的主要驱动因子之一^[3]。林地开垦通过改变植被类型或植被覆盖度对陆地生态系统的分布和结构产生重要影响,进而影响生态系统的功能和过程。林地开垦为农田,植被和土壤碳储量大大降低,土壤大团聚体有机碳含量大幅减少,加剧了温室气体向大气的排放^[4]。经过开垦平整的林地,深层疏松土层置于林地表层,土壤的黏结性和黏着性受到破坏,植被根系、生物、微生物被深埋在地下深层而逐渐消亡,同时导致土壤结构稳定性降低,容重增大,入渗性能降低,造成土壤质量和生产力下降^[5]。开垦后生态脆弱性显著增加,水土流失、沙化渐趋严重^[6]。这些变化通过影响水热条件和过程,改变土壤养分循环,进而导致土壤肥力发生变化。因此,林地开垦对土壤养分的影响是目前关注的焦点。

土壤养分空间分布的异质性是影响植物生长和获取资源的重要因素。近年来,学者们对土壤养分空间变异的形成和影响因素开展了大量的研究并取得了重要进展。Andivia 等^[7]认为,对地中海软木橡森林土壤资源的空间异质性主要由树木斑块状分布引起;Tateno 等^[8]和王华等^[9]认为,坡型、坡度和坡向是影响土壤性质空间异质性的因素;Wei 等^[10]发现,灌木入侵增大了黄土高原北部草地土壤养分的空间异质性。尽管目前学者在土壤养分空间分布方

面开展了大量的工作,但是林地开垦后土壤侵蚀驱动的营养分布和空间变异规律尚不清楚,限制了对土壤退化机理的认识。

我国黄土高原是世界上土壤侵蚀和土地退化最为严重的地区之一,该区植被带为森林和森林草原地带,但是由于森林的大量砍伐和开垦,土壤侵蚀和水土流失严重,生态环境脆弱^[11]。本研究选取位于黄土高原丘陵沟壑区的子午岭次生林区,对人为破坏植被加速侵蚀后土壤养分分布进行研究,结合经典统计和地统计学方法,探讨林地开垦后坡面表层土壤养分变化及其与坡位的关系,以确立林地开垦后受侵蚀驱动的坡地土壤养分再分布规律和空间变异特征,从而为认识侵蚀环境林地开垦造成的土壤退化机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西富县子午岭次生林区土壤侵蚀与生态环境观测站。该观测站建于 1988 年,旨在研究黄土高原土壤侵蚀发生发展过程与生态环境演变的关系。地理位置为东经 $109^\circ 11'$,北纬 $36^\circ 05'$,布设于区内的北洛河三级支流的瓦窑沟小流域,海拔 $920 \sim 1683 \text{ m}$,相对高差 $100 \sim 150 \text{ m}$ 。研究区多年平均气温 9°C ,年降水量 576.7 mm ;降雨主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 70% 以上。子午岭林区天然次生林郁闭度达 0.7 以上,主要树种有辽东栎、山杨和白桦。林下草灌丰茂,主要有绣菊、胡枝子、白草、羽茅和铁杆蒿等,地面枯枝落叶层厚约 $2 \sim 5 \text{ cm}$ 。土壤为褐土,腐殖质层明显,根系密集,团粒结构良好,淋溶层与淀积层发育不明显。试验区坡向为西南,从分水线至谷坡脚为完整、典型的黄土丘陵区自然坡面。在开垦破坏前,林木郁闭度及草被覆盖度与现对照林地相似。

1.2 试验方法

1989 年试验站成立时,选取 2 个坡面形态不同的完整坡面,将其地面上原有植被砍伐,去掉枯枝落叶层,深翻 $20 \sim 35 \text{ cm}$,并去掉树根和草根,以模拟森林开垦。开垦后每年雨季前,按照当地传统耕作方式

对地面进行除草及翻耕,翻耕深度 20 cm,翻耕后将地面耙平,以模拟耕作。开垦坡面未种植作物,未施肥。开垦 28 年后,土壤侵蚀严重,细沟和浅沟均发育明显。

本研究选取 2 个开垦坡面(S1 和 S2)为对象,同时选取与开垦坡面相邻的森林植被完好的完整坡面(FL)作为对照,以比较森林砍伐和开垦的影响。所选取的未开垦和开垦坡面特征见表 1。于 2017 年雨季前(5 月)在所选取坡面从坡顶到坡底部每隔 4 m 设 1 个样带,在每个样带内设 5 个样点分别采取表层(0—20 cm)土壤样品,混合为 1 个样带土样,带回实验室风干,去除根系等杂物,过 2,0.25 mm 筛后分别测定土壤 pH、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺)、硝态氮(NO₃⁻)、速效磷(AP)和速效钾(AK)含量。

土壤 pH 用电导仪测定(水土比 2.5 : 1),OM 用重铬酸钾外加热氧化法测定,TN 用半微量凯氏定氮法测定,TP 用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定,NH₄⁺和 NO₃⁻用氯化钾浸提—AA3 流动分析仪检测法测定,AP 用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,AK 用醋酸铵浸提—原子吸收法^[12]测定。

表 1 坡面主要形态特征

处理	坡长/m	坡宽/m	坡度/(°)			采样个数
			上坡位	中坡位	下坡位	
开垦坡地 1	79	13	22	35	29	19
开垦坡地 2	83	13	13	35	33	20
林地	144	12	42	48	49	36

1.3 数据分析

本研究采用方差分析检验林地开垦对土壤性质和养分的影响及其与坡位之间的关系,用相关分析建立不同指标之间的关系,用半变异函数分析和空间自相关分析确立坡面土壤性质和养分的空间变异特征。

所有数据的基本统计采用 Excel 2013 软件。运用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和多重比较,分析不同坡面(FL、S1 和 S2)、不同坡位(上坡位、中坡位和下坡位)的土壤性质和养分分布及开垦和坡位的交互作用。采用单样本 *K-S* 检验法对数据进行正态分布检验,对不符合正态分布的进行对数转换。

表 2 开垦和坡位及其交互作用对土壤各指标影响的双因素方差分析

因素	pH	有机质	全氮	全磷	铵态氮	硝态氮	速效磷	速效钾
开垦	214.43(0)	559.42(0)	607.09(0)	174.78(0)	149.23(0)	19.68(0)	171.04(0)	70.60(0)
坡位	0.71(0.496)	3.05(0.054)	3.30(0.043)	24.29(0)	4.09(0.021)	6.05(0.004)	0.14(0.866)	8.72(0)
开垦×坡位	1.50(0.211)	4.91(0.002)	7.51(0)	12.93(0)	7.21(0)	7.58(0)	0.76(0.552)	9.49(0)

注:表中括号外数据为 *F*;括号内数据为 *P*。

林地开垦 28 年后,强烈的土壤侵蚀导致坡面养分大量流失,坡地上、中、下 3 个坡位侵蚀强度不同,形成不同的养分分布格局。

通过 GS⁺ 9.0 软件进行地统计学的半方差函数的拟合,半变异函数 $r(h)$ 是地统计学中研究空间变异性的关键函数,反映了不同距离观测之间的变化,计算公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n 2(Z(x_i) - Z(x_{i+1}))^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ 为半变异函数; h 为 2 样点间空间间隔距离(m); $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样点对的总数(个); $Z(x_i)$ 和 $Z(x_{i+1})$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 x_{i+1} 的实测值。定量描述研究区的变异特征时,需要通过模型的最优拟合,来建立变异系数的理论模型。通过决定系数 R^2 和残差平方和 RSS 的比较来选择最优理论模型。决定系数 R^2 值越大,说明模型配合的理论曲线精度越高,残差平方和 RSS 是回归精度的重要参数,其值越小,说明拟合曲线与实际配合越好。

采用 Moran's I 指数定量描述变量在空间上的依赖程度,判断区域化变量在研究区内是否存在空间聚集区和空间孤立区。计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: n 为参与分析的土壤样品的数目(个); x_i 、 x_j 分别为样品 i 和样品 j 的观测值; \bar{x} 为所有样品观测值的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵值。 I 取值在 -1 到 1,其值越大,空间结构性越显著, $I > 0$ 表示变量在空间上呈现正相关,存在空间聚集; $I < 0$ 表示研究变量在空间上呈现负相关,存在空间孤立; $I = 0$ 表示研究变量不存在空间自相关性。

2 结果与分析

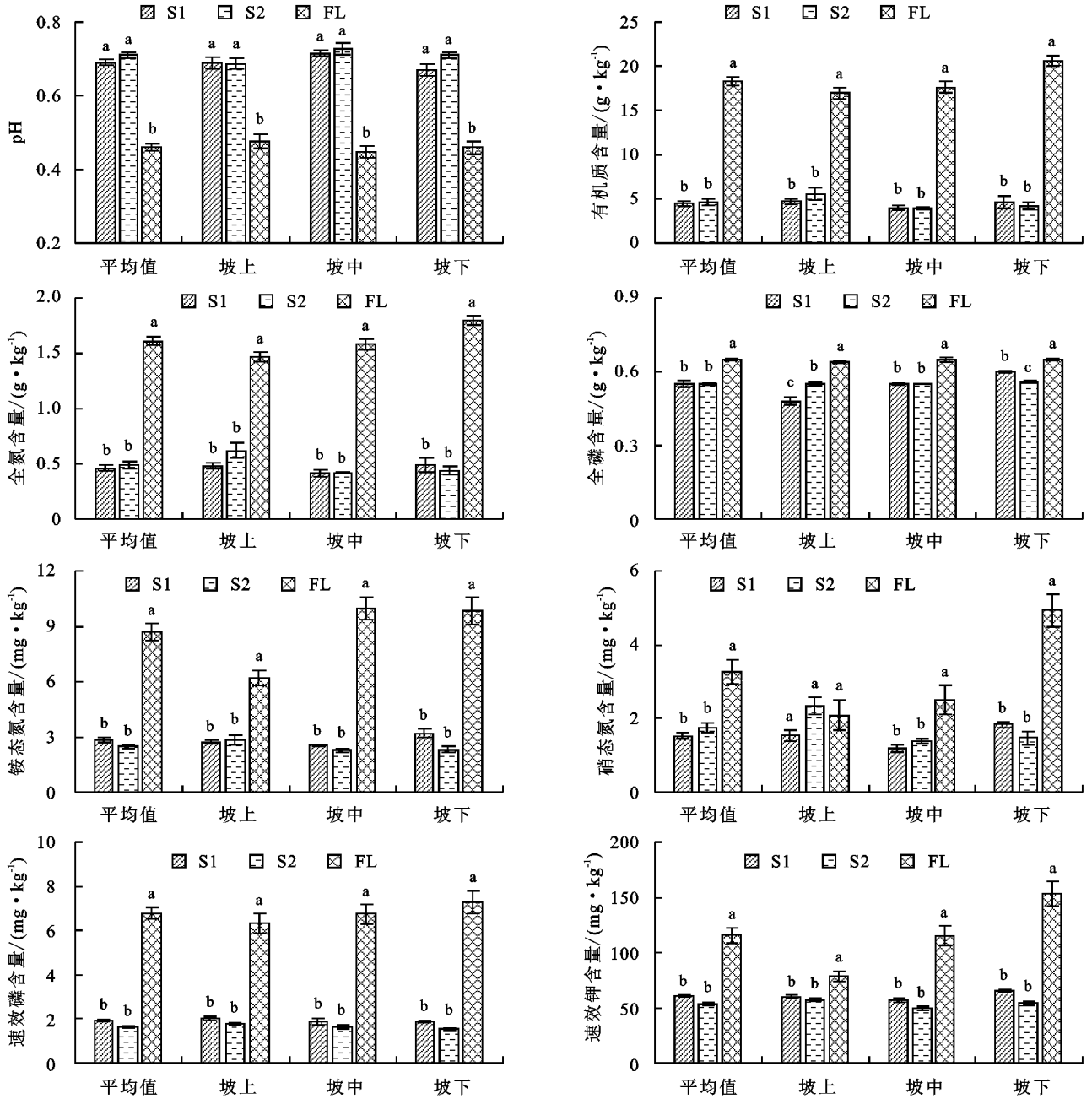
2.1 林地开垦对土壤养分含量的影响

对于林地和 2 个开垦坡面来说,土壤 pH 和 AP 不受坡位影响($P = 0.496, 0.866$),如 pH 的平均值在上、中、下坡位分别为 8.62, 8.63, 8.61; AP 分别为 3.38, 3.43, 3.55 mg/kg。其他养分在不同坡位之间差异显著,均以上坡位和中坡位较低,下坡位较高($P = 0 \sim 0.054$) (表 2)。

林地开垦极显著增加了土壤 pH,但是降低了养分含量($P < 0.01$)。对于整个坡面来说,林地开垦后土壤 pH 增加了 0.24 ± 0.01 个单位,OM、TN、TP、

NH_4^+ 、 NO_3^- 、AP 和 AK 分别降低了 (13.77 ± 0.05) 、 (1.14 ± 0.01) 、 (0.10 ± 0) g/kg 和 (6.05 ± 0.12) 、 (1.63 ± 0.07) 、 (4.99 ± 0.10) 、 (58.44 ± 2.55) mg/kg。此外,开垦对坡面 pH 和 AP 的影响与坡位无关,但是对其

他性质的影响则与坡位有关。OM、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 AK 的降低均以下坡位最大,中坡位其次,上坡位最小。TP 在上坡位降低量最大,中坡位其次,下坡位最小(图 1)。



注:误差线为标准误差;不同小写字母表示不同坡面下的差异显著($P < 0.05$);S1 为开垦坡面 1;S2 为开垦坡面 2;FL 为未开垦林地。

图 1 林地和开垦地土壤各指标平均值和坡位分布

林地开垦还改变了土壤性质和养分在坡面的变异系数。林地土壤 OM、TN、TP 的变异系数分别为 14.5%、12.8%、3.9%,均小于开垦坡地(分别为 28.9%、27.7%、6.4%);林地 pH、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、AP 和 AK 的变异系数分别为 0.7%、31.1%、60.2%、24.1%、36.7%,均显著大于开垦坡地(分别为 0.4%、18.9%、30.3%、12.3%、9.0%)。pH、TP 和 AK 的变异系数 $< 10\%$,属弱变异,其他指标的变异系数均介于 $10\% \sim 100\%$,属中等变异。

2.2 坡地土壤养分变异特征

通过不同模型方法的拟合和比较,依据 R^2 越大和 RSS 越小的原则,确定各指标适用的半变异函数模型,获得了土壤性质和养分含量的半方差模拟模型及相应的拟合参数(表 3)。不同土壤指标的空间变异特征差异较大,而且林地开垦改变了坡面土壤养分空间分布特征。土壤性质和养分含量在开垦坡面 S1 的半变异函数模型主要为高斯模型,在开垦坡面 S2 主要为高斯和指数模型,在林地主要为高

斯和球状模型。所有坡面大多数土壤指标的 $C_0/(C_0+C) < 30\%$, 具有强烈的空间相关性, 其空间分布主要受结构性变异控制。此外, 开垦坡地 OM、TN、TP、 NH_4^+ 、AP 和 AK 的 $C_0/(C_0+C)$ 值小于林地, 表明开垦增大了这些指标的空间异质性; pH 的 $C_0/(C_0+C)$ 值则高于林地, 表明开垦降低了其空间变异程度。

表3 林地和开垦地土壤各指标半变异函数理论模型及相关参数

指标	坡地类型	模型	块金常数 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金值/基台值 ($C_0/(C_0+C)$)	变程/m	决定系数	残差平方和
pH	S1	G	0.001	0.006	9.5	104	0.926	1.36E-07
	S2	G	0.001	0.002	49.8	62	0.710	1.86E-01
	FL	G	0	0.003	0.3	8	0.088	1.05E-05
有机质	S1	G	0.006	0.040	14.4	114	0.709	1.87E-05
	S2	E	0.183	1.193	15.3	50	0.912	0.05
	FL	S	2.880	6.479	44.5	26	0.544	8.79
全氮	S1	G	0.007	0.033	20.7	85	0.836	1.45E-05
	S2	E	0.051	1.984	2.6	107	0.981	0.02
	FL	S	0	0.003	21.0	27	0.403	6.16E-06
全磷	S1	G	0	0.005	7.5	65	0.992	4.45E-08
	S2	G	0	0	6.0	8	0.473	7.25E-09
	FL	G	0	0	17.3	4	0.005	3.22E-08
铵态氮	S1	S	0.036	0.273	13.3	32	0.993	2.37E-04
	S2	S	0	0.226	0	9	0.684	2.96E-03
	FL	S	2.990	13.330	22.4	162	0.811	12.50
硝态氮	S1	G	0.057	0.198	28.6	26	0.962	6.73E-04
	S2	G	0.008	0.032	23.7	47	0.977	9.53E-06
	FL	G	1.630	6.269	26.0	128	0.904	1.37
速效磷	S1	S	0.007	0.652	10.7	5	0.002	2.23E-03
	S2	E	0.366	1.951	18.8	243	0.518	0.22
	FL	G	1.265	3.414	37.1	48	0.925	0.73
速效钾	S1	G	0	0.002	13.6	37	0.982	5.23E-08
	S2	G	0	0.003	18.0	32	0.890	6.47E-07
	FL	G	0.010	0.023	46.8	52	0.895	3.55E-05

注:G 为高斯模型;S 为球状模型;E 为指数模型;S1 为开垦坡面 1;S2 为开垦坡面 2;FL 为未开垦林地。

2.3 坡地土壤养分空间自相关分析

各指标的 Moran's I 指数值和自相关范围表现各异, 说明不同养分的空间依赖程度不同(图 2)。林地 pH 和 TP 有多个正、负相关范围, 将较近的 0~4, 0~8 m 作为其自相关范围, 表明土壤 pH 和 TP 沿坡面分布较均匀, 与描述性统计结论一致。开垦坡面不同土壤性质和养分的空间相关性较为相似, 土壤 pH、OM、TN、TP、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、AP 和 AK 正自相关距离分别为 0~20, 0~16, 0~20, 0~28, 0~14, 0~18, 0~28, 0~18 m, 且均随着滞后距离的增加而呈下降趋势, 从正相关转变为负相关关系, >28 m 后所有指标的 Moran's I 指数值均为负值且随距离增

变程表示属性因子空间自相关范围的大小, 变程以内的空间变量具有空间自相关性, 变程以外则不存在空间自相关。本研究中土壤各指标的变程范围介于 4~243 m, 大于采样距离 4 m, 表明本研究的取样间距能反映土壤特性的空间相关性(表 3)。林地开垦后, 坡面土壤 pH、OM、TN 和 TP 的变程均有所增加; NH_4^+ 、 NO_3^- 和 AK 的变程则有所减小。

大逐渐减小, 空间自相关性逐渐减弱。林地开垦后土壤 pH 和 TP 的空间自相关范围增大, 而 OM、TN、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 AK 的自相关范围减小, 而且开垦坡面的土壤各指标 Moran's I 指数值较林地变大, 空间自相关性增强。

3 讨论

3.1 林地开垦对坡地土壤养分含量的影响

本研究表明, 黄土高原侵蚀环境林地开垦后土壤 pH 显著增加, 而养分含量显著降低。林地开垦后土壤 pH 升高主要与土壤有机质的减少所造成的有机酸减少有关^[13]。已有研究^[14]表明, 土壤 pH 与有机质含量之间有着极显著的负相关关系, 本研究中土壤

pH 也随有机质的增加而降低 ($r = -0.914, P < 0.0001$)。林地开垦后土壤有机质的降低与土壤有机质输入减少、有机质分解加剧和迁移损失有关。在开垦前,林地每年有大量的地上部凋落物和植物根系归还到土壤中,为土壤输入了大量的有机质^[15]。林地开垦后土壤无有机物质输入,有机质显著减少。另一方面,林地开垦后的翻耕作用使土壤中原有有机质与空气

充分接触,而且破坏了土壤结构,降低了土壤结构体(团聚体)对有机质的物理保护作用,有机质氧化分解加速,从而大幅降低^[16]。林地开垦后由于侵蚀造成的坡面土壤颗粒流失也是有机质降低的一个主要原因。在土壤侵蚀过程中,土壤中的细颗粒流失最为严重,而此部分有机质含量显著高于粗颗粒^[17],造成侵蚀泥沙中有机质的富集和原有土壤中有有机质的减少。

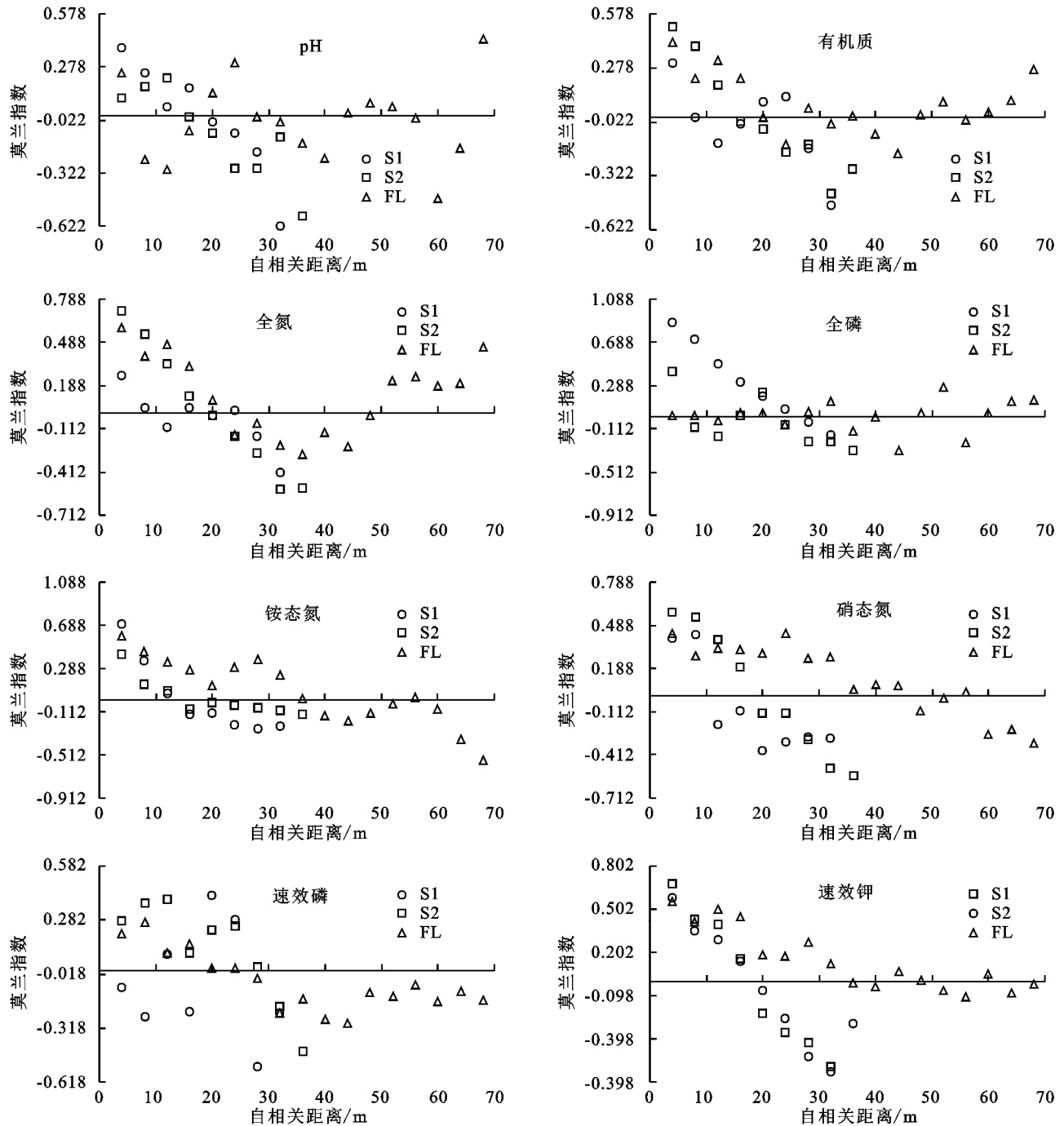


图 2 林地和开垦地土壤各指标空间自相关

开垦后全氮和全磷的降低主要是随地表径流和径流泥沙迁移造成的。坡面氮流失主要是水溶态和泥沙结合态 2 种形态,磷流失以泥沙态磷为主,而且全氮和全磷流失量以及泥沙总氮和总磷与坡面产流产沙之间存在极显著相关性^[18]。林地开垦后速效养

分的降低不但与全量养分的损失有关,还与可溶态养分随径流液的流失有关,吴东等^[19]发现,三峡地区土壤硝、铵态氮通过溶解于径流并伴随径流流失的比例在 90% 以上。此外,土壤性质恶化所造成的养分转化效率降低也造成林地开垦后速效养分的减少,

Kisic 等^[20]发现,林地开垦后氮素和磷素矿化显著降低。林地开垦后,土壤微生物群落的功能多样性降低,改变了与氮循环有关的微生物组成和潜在功能,从而影响了土壤中的氮矿化^[21]。

开垦后的坡地土壤养分含量逐渐减少,但减少幅度因坡位而异,这可能是不同坡位侵蚀和土壤颗粒迁移强度不同造成的^[22]。本研究中,开垦坡面 S1 和 S2 在坡顶的坡度最小(分别为 22°和 13°),雨水冲击和坡面径流较小,径流液与土壤接触时间较长,入渗较多,土壤养分迁移流失较少。坡中部和下部坡度较大,如 S1 的坡度分别为 35°和 29°,S2 的坡度分别为 35°和 33°,降雨形成的径流量和流速增加,入渗时间短,坡面冲刷力增大,土壤侵蚀和坡面物质迁移强烈,而且来源于坡上部的侵蚀泥沙难以沉积,林地开垦后该部位土壤养分迁移损失强烈,降低幅度远大于坡上部。

3.2 林地开垦对坡地土壤养分空间异质性的影响

林地开垦破坏后,土壤 OM、TN、TP、NH₄⁺、AP 和 AK 的空间异质性增大,由空间自相关引起的结构性变异达 75%以上,空间变异主要由地形、土壤母质和人类活动所引起。开垦坡地在降雨、径流和重力的作用下,泥沙冲刷沉降过程复杂,土壤颗粒携带大量养分从高处到低处进行着微距离或短距离的迁移,使得坡地较小的范围内就可能形成大量不同的生境,土壤养分表现出随着坡长和坡位而变化的较高空间异质特性^[23]。林地开垦后土壤在植被、地形及人为干扰等因素相互作用下,在坡面形成不同水平物质和能量的小生境,影响土壤的理化性质,造成养分分布的复杂变化,明显增加了区域土壤性质的空间异质性^[24]。pH 的空间异质性减弱,随机因素对其影响增强,主要是由于林地 pH 显示出纯块金效应,在空间分布上差异性不大,在整个景观尺度上具有较稳定的变异。

土壤性质和养分在各坡面上都有一定的连续性,但各指标的变程范围差异较大,说明影响这 8 个指标的生态过程在不同的尺度上起作用。林地开垦增大了 pH、OM、TN 和 TP 的空间依赖性,但降低了 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 AK 的空间依赖性。开垦后随着时间的推移,水土流失严重,土壤侵蚀强度和人为干扰都会改变变程变化距离。Yin 等^[25]在灌木丛中的研究也表明,侵蚀增加了土壤 OM 的空间自相关尺度。本研究表明,林地开垦显著降低了土壤养分含量,却增强了部分养分的空间异质性,这种改变会影响群落结构、生物多样性和土地生产力,加剧生态系统脆弱退化,可能导致严重的生态环境问题。

4 结论

(1)黄土高原子午岭次生林区开垦 28 年后,表层

土壤养分含量显著降低,pH 显著升高。土壤养分的降低以中坡位和下坡位较大,上坡位较小。

(2)林地和开垦坡地土壤 pH 和养分均具有中等或强烈的空间自相关性。林地开垦增大了土壤有机质、全氮、全磷、铵态氮、速效磷和速效钾的空间异质性,而且开垦后这些指标空间分布受地形等结构因素的影响增强。

(3)坡地 pH、有机质、全氮和全磷空间自相关范围增大;铵态氮、硝态氮和速效钾空间自相关范围减小,而速效磷在 2 个坡面上的变化规律不一致。

参考文献:

- [1] Keenan R J, Reams G A, Achard F, et al. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 9-20.
- [2] Wang C Y, Myint S W. Environmental concerns of deforestation in myanmar 2001-2010 [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 728-742.
- [3] Osman K. Soil degradation, conservation and remediation [M]. Netherlands: Springer, 2013.
- [4] 常亚鹏,李路,许仲林.天山北坡雪岭云杉林地开垦的土壤有机碳损失估算[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1168-1173.
- [5] 郑粉莉,张锋,王彬.近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6044-6051.
- [6] 丁肇慰,陈锡云,陈昌华,等.开垦 60 年东北三江平原典型产粮区生态脆弱性时空格局演变分析:以 859 农场为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 77-83.
- [7] Andivia E, Fernandez M, Alejano R, et al. Tree patch distribution drives spatial heterogeneity of soil traits in cork oak woodlands [J]. *Annals of Forest Science*, 2015, 72(5): 549-559.
- [8] 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 [J]. *Ecological Research*, 2003, 18(5): 559-571.
- [9] 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*, 2016, 37(24): 8285-8293.
- [10] Wei X R, Huang M B, Shao M A, et al. Shrubs increase soil resources heterogeneity along semiarid grass slopes in the Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, 88(1): 175-183.
- [11] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 429-436.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析 [M]. 3 版.北京:中国农业出版

- 社,1999.
- [13] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, et al. Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2018,29:3521-3533.
- [14] Guidi C, Vesterdal L, Gianelle D, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen following forest expansion on grassland in the Southern Alps[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014,328:103-116.
- [15] Li D F, Gao G Y, Lu Y H, et al. Multi-scale variability of soil carbon and nitrogen in the middle reaches of the Heihe River basin, northwestern China[J]. *Catena*, 2016,137:328-339.
- [16] Liu Y, Yu D S, Wang N, et al. Impacts of agricultural intensity on soil organic carbon pools in a main vegetable cultivation region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013,134(8):25-32.
- [17] Zhao L P, Sun Y J, Zhang X P, et al. Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols; Relationship to the predicted capacity[J]. *Geoderma*, 2006,132(3/4):315-323.
- [18] 张梦,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018,32(1):85-90.
- [19] 吴东,黄志霖,肖文发,等.三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. *环境科学*, 2015,36(10):3825-3831.
- [20] Kisić I, Bogunović I, Zgorelec Z, et al. Effects of soil erosion by water under different tillage treatments on distribution of soil chemical parameters[J]. *Soil and Water Research*, 2018,13(1):36-43.
- [21] Merloti L F, Mendes L W, Pedrinho A, et al. Forest-to-agriculture conversion in Amazon drives soil microbial communities and N-cycle[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019,137:188-196.
- [22] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷Cs示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J]. *水土保持学报*, 2019,33(1):64-69.
- [23] Jiang Y L, Zheng F L, Wen L L, et al. Effects of sheet and rill erosion on soil aggregates and organic carbon losses for a Mollisol hillslope under rainfall simulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(1):467-477.
- [24] 吴海勇,曾馥平,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009,15(5):1029-1036.
- [25] Yin C H, Shi Q M, Zhao X, et al. The role of tamarisk in the spatial heterogeneity of soil resources in the northern Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. *Plant and Soil*, 2017,420(1/2):523-538.
- (上接第 312 页)
- [14] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorous[J]. *Soil Science*, 1957,84:133-144.
- [15] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010,45(2):4-6.
- [16] 王海云,姜远茂,彭福田,等.胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2008,39(1):31-38.
- [17] 李中阳,徐明岗,李菊梅,等.长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征[J]. *土壤通报*, 2010,41(6):160-165.
- [18] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等.长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究[J]. *土壤通报*, 2012,43(5):1187-1194.
- [19] 席雪琴,孙本华,陈勇,等.塿土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(6):34-40.
- [20] 刘晶晶.苹果主产区土壤磷素状况、淋失阈值及阻遏技术研究[D].山东泰安:山东农业大学,2018.
- [21] 王富林,门永阁,葛顺峰,等.两大优势产区‘红富士’苹果园土壤和叶片营养诊断研究[J]. *中国农业科学*, 2013,46(14):2970-2978.
- [22] 张邦喜,李渝,秦松,等.长期施肥下黄壤无机磷组分空间分布特征[J]. *华北农学报*, 2016,31(3):212-217.
- [23] 张树金,余海英,李廷轩,等.温室土壤磷素迁移变化特征研究[J]. *农业环境保护*, 2010,29(8):1534-1541.
- [24] Lydia P O, Peter M V. Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest[J]. *Ecosystems*, 2004,7(4):404-419.
- [25] 介晓磊,杨先明,黄绍敏,等.石灰性潮土长期定位施肥对小麦根际无机磷组分及其有效性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(2):53-58.
- [26] Wang J, Liu W Z, Mu H F, et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-year superphosphate application[J]. *Pedosphere*, 2010,20(3):304-310.
- [27] 程艳丽,程希雷,邹德乙,等.棕壤长期定位施肥 15 年后磷素形态及有效性[J]. *土壤通报*, 2009,40(6):1362-1366.