

黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变

许明祥, 刘国彬

(中科院、水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探明黄土丘陵沟壑区人工林土壤养分状况及其演变规律,应用时空互代的方法,以刺槐林为代表,对该区不同利用年限的人工林土壤养分特征及其时空变化等进行了系统研究。结果表明,黄土丘陵区人工林土壤肥力处于低水平;人工林表层土壤养分中有机质和速效磷的空间变异性较大;坡度、坡向、坡位等环境因子对土壤养分有一定的影响。随利用年限的增加,人工林土壤全氮,有机质、碱解氮、速效钾含量及土壤养分指数均增加,与利用年限有极显著的相关性,其变化趋势符合 $y = ax^b$ 模型。全氮,有机质和碱解氮随利用年限的增加量不显著,而速效钾每经过 10 年就有显著增加,全磷和速效磷含量则保持相对衡定的水平。黄土丘陵区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾及养分指数年增长率分别约为 0.20g/kg、0.01g/kg、0.69mg/kg、2.27mg/kg 和 0.04。该区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮及养分指数约需 50 年、速效钾约需 30 年可达到中上等养分水平。

关键词: 土壤养分; 演变; 人工林; 黄土丘陵区

中图分类号: S714.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2004)01-0040-07

The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau

XU Ming-xiang, LIU Guo-bin

(Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and MOW, Northwest Univ. of Agric. and forest, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to know the soil nutrient condition and its evolution in artificial forest land in the hilly Loess Plateau region, the soil characteristics and its temporal and spatial variation in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land with different ages were studied systematically through the approach of substituting the temporal serial with spatial serial. The result showed that the soil nutrient content of artificial forest land in the region was at the low level. The spatial variability of soil organic matter and phosphorous content was larger than that of the other nutrient in topsoil of artificial forestland. The environment factors, such as gradient, aspect and position of the slope, had effect to some extent on soil nutrient. The nutrient content of total nitrogen (TN), organic matter (OM), available nitrogen (AN), available potassium (AK) and soil nutrient index (SNI) increased with the increasing of land use years. A significant correlation was found between the nutrient content in artificial forest land and its land use years except total potassium (TK) and total phosphorus (TP). The SNI was also significantly correlated with land use years. The correlation could be simulated with the following formula: $y = ax^b$. No significant increase of OM and AN was found with the increase of land use year. However, AK increased significantly every 10 years. TP and available phosphorus (AP) kept a relatively stable content in different land use years. The content of OM, TN, AN and AK and SNI increased with land use year at a rate of 0.201g/kg, 0.010g/kg, 0.69mg/kg, 2.27mg/kg and 0.4 per year respectively in artificial forestland. In the hilly

收稿日期: 2003-03-17

修改稿收到日期: 2003-05-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018606); 中国科学院知识创新项目(KZCX1-06);

国家自然科学基金项目(40301028)资助。

作者简介: 许明祥(1972—),男,陕西吴旗人,助研,博士研究生,主要从事土壤质量及流域生态系统健康诊断研究。

Loess Plateau region, OM, TN, AV and SNI could reach to the middling nutrient level of the region after 50 years and AK could reach to the middling to up level after 30 years in artificial forestland.

Key words: soil nutrient; evolution; artificial forest land; hilly Loess Plateau

植被建设是生态环境建设的重要内容。人工林在黄土高原水土保持及生态环境建设中占据重要地位。目前黄土高原水土流失区人工林地面积约 101.61 万公顷^[1],并将进一步增加。已有的研究表明,人工林不仅具有显著的水土保持功能,而且能明显改善土壤肥力^[1-2]。有关人工林地土壤养分方面的研究已有很多,但多集中在林地开垦后土壤养分退化^[3-5]、不同林型下或不同植被演替阶段土壤养分特征^[6-11],而不同利用年限人工林地土壤养分演变研究少见报道^[12-14]。而且,有关土壤肥力演变的研究或者是时间序列不连续,或者是样地重复少,不具有统计学意义,因而难以准确反映土壤肥力演变的真实情况。因此,本研究以黄土高原主要的造林树种刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为对象,系统分析了黄土丘陵沟壑区人工林土壤养分状况、时空分异及其与环境因子的关系,重点探讨了人工林土壤养分演变规律及其趋势,以期为该区科学有效地进行人工林建设,土壤质量的恢复与保育,促进黄土高原生态环境建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在陕西安塞县(东经 108°51'44"—109°26'18",北纬 36°30'45"—37°19'31")的纸坊沟、县南沟、北宋塔(高桥乡)和桥庄村陀山(楼坪乡)进行。该区属典型的黄土丘陵沟壑区,属暖温带半旱季风气候。平均海拔 1200m,相对高差 100~300m,年均气温 8.8℃,年均降水量 505.3mm,无霜期 157d。地带性土壤为黑垆土,由于水土流失严重,黑垆土损失殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润雏形土)为主。刺槐是黄土高原人工造林的主要树种,在黄土高原分布广泛,黄土丘陵沟壑区乔木林中刺槐占 80% 以上。

1.2 研究方法

应用时空互代的方法(在一定的空间尺度内,以不同地点上选取的不同利用年限的刺槐林地来代替同一地点上生长的不同年限的刺槐林地),保证所选择的样地土壤与成土母质类型一致,土壤没有因自然或人为因素的作用而出现地形的变迁或明显的土

壤物质再分配;刺槐林营造和管理方法一致。在研究区内选不同利用年限(包括 3 年幼林到生长 43 年的成熟林)的刺槐人工林地 29 个,在取样点周围随机选择 5 个点,取 0—20cm(部分样点取剖面样:0—20、20—40、40—60cm)土壤混合样。同时,观测并记录取样点的地形、地貌、坡度及植被等环境因子。研究样地的土壤类型为黄绵土,其基本情况见表 1。另外,本研究还选取了 4 个天然次生辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林地(富县进土庙梁,延安燕儿沟)土壤剖面样供作比较。土样经风干,剔除其中根系、石块等杂物,按常规方法测定土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、速效磷及速效钾含量^[15]。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分特征

人工林表层(0—20cm)土壤养分特征见表 2。与天然林相比,人工林土壤全氮、有机质、碱解氮和速效磷的平均含量仅为天然林的 24.7%、21.8%、21.3% 和 35.9%。全磷和速效钾分别为天然林的 88.3% 和 55.2%。人工林土壤养分含量与天然林之间差异极显著。

依据黄土高原地区土壤养分含量分级^[16],研究区人工林土壤全氮、有机质和碱解氮含量属于低水平,速效钾含量为中等水平。尽管全磷含量处于中等偏上水平,但速效磷含量却处于很低水平。表明该区人工林土壤肥力处于低水平。

由于黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀严重,人工林在未达到一定的郁蔽度而发挥水土保持功能时,其土壤以侵蚀导致的生土化过程为主,加之该区人工林地无肥料投入,因此土壤肥力较低。土壤全磷含量主要受母质中矿物成分影响。由于黄土母质中含磷矿物丰富,所以该区土壤全磷含量较高。而速效钾含量相对较高也与黄土母质富含钾矿物有关。

土壤养分是林木生长的基础,肥力直接影响林木生长,为了促进黄土丘陵区人工林可持续发展,需要通过合理配置树种、建立混交林,保护林地枯枝落叶,适当增施氮、磷及有机肥等途径来提高该区“低氮低磷”型人工林土壤肥力水平。

表 1 研究样地的基本情况
Table 1 Characteristics of the studied site

编号 No.	深度(cm) Depth	海拔(m) Elevation	坡度(°) Gradient	坡位 Position	坡向 Aspect	地形 Relief	林龄(a) Age of tree
1,2	0—20	1309,1166	15,30	M,U	阴 Shade, 阳 Light	HS,GS	3
3,4	0—20	1373,1274	22	U,M	阴 Shade, 阳 Light	HS	5
5	0—20	1277	25	M	阳 Light	GS	8
6	0—20	1274	24	U	阳 Light	HS	10
7	0—20	1101	34	M	阴 Shade	GS	12
8—13	0—20	1210—1277	26—35	M5,L1	阴 Shade 2, 阳 Light 4	GS 3,HS 3	15
14	0—20	1227	22	M	阳 Light	GS	17
15	0—20	1326	5	U	阳 Light	HS	20
16	0—60	1225	28	M	阳 Light	HS	22
17—20	0—20	1158—1285	16—30	U2,M1,L1	阴 Shade 2, 阳 Light 2	GS 3,HS 1	25
21	0—20	1295	32	M	阳 Light	GS	27
22—25	0—20	1130—1327	20—33	U1,M2,L1	阳 light	GS 3,HS 1	30
26	0—60	1130	26	M	阴 Shade	HS	31
27	0—20	1112	26	L	阳 Light	GS	37
28—29	0—60	1108	20	L	阴 Shade	GS	43

注：U、M、L 分别表示上、中、下坡位；HS、GS 表示梁峁坡和沟坡；坡位、坡向和地形描述中的数字代表样地个数。
Note: U, M, L means upper, middle, and lower position; HS and GS means hillside and gully slope, respectively; The numbers in the description of position, aspect and relief is the number of studied site.

表 2 人工林表层(0—20cm)土壤养分统计性描述
Table 2 Statistical description of soil nutrients (0—20cm) in the planted forest land

项目 Item	全氮 TN (g/kg)		全磷 TP (g/kg)		有机质 OM (g/kg)		碱解氮 AN (mg/kg)		速效磷 AP (mg/kg)		速效钾 AK (mg/kg)	
	PF	NF	PF	NF	PF	NF	PF	NF	PF	NF	PF	NF
样本 Sample	29	4	29	4	29	4	29	4	29	4	29	4
最小值 Min	0.25	1.57	0.41	0.63	4.70	30.28	16.15	135.96	0.61	2.87	52.40	176.65
最大值 Max	0.95	2.92	0.64	0.70	20.30	66.20	65.29	204.61	4.02	8.30	173.15	246.40
平均 Mean	0.50	2.02	0.58	0.66	9.06	41.52	33.71	158.00	1.62	4.50	111.26	201.69
SD	0.15	0.61	0.05	0.04	3.47	16.65	11.60	31.47	0.61	2.57	37.44	31.56
CV%	29.9	30.3	9.1	5.6	38.4	40.1	34.4	19.9	37.9	57.2	33.6	15.7
F	144.6**		7.9**		98.2**		249.8**		29.8**		21.1**	

PF—人工林 planted forest; NF—自然林 Natural forest. ** 表示差异达 1% 显著水平。 ** means the difference is significant at the 1% level.

对人工林土壤各养分指标之间相关分析结果表明,有机质、全氮和碱解氮之间具有极显著的相关性($r_{\text{全氮-有机质}} = 0.980^{**}$, $r_{\text{有机质-碱解氮}} = 0.920^{**}$, $r_{\text{全氮-碱解氮}} = 0.931^{**}$, $n = 29$),有机质与速效钾之间也有显著的相关性($r_{\text{有机质-速效钾}} = 0.423^{*}$, $n = 29$),这与前人研究结果具有一致性^[9]。通过回归分析可以得到黄土丘陵区人工林土壤有机质、全氮、碱解氮及速效钾之间的转换函数:

$$y_{\text{有机质}} = 22.124x_{\text{全氮}} - 0.208, r = 0.994^{**};$$
$$y_{\text{碱解氮}} = 77.825x_{\text{全氮}} - 4.246, r = 0.988^{**};$$
$$y_{\text{碱解氮}} = 3.446x_{\text{有机质}} + 4.005, r = 0.974^{**};$$

$$y_{\text{速效钾}} = 2.750x_{\text{有机质}} + 86.489, r = 0.721^{**}。$$

2.2 养分的空间变异性

土壤养分的空间变异分析是土壤养分管理和合理施肥的基础,其变异系数是土壤性质的内在反映,能够区别不同土壤养分对外界条件的敏感性。本研究中样地选择在黄土丘陵沟壑区安塞县中部和南部的纸坊沟、县南沟、北宋塔和桥庄村陀山 4 条小流域,可代表安塞县 2950km² 县域的土壤和气候环境。对不同样点之间及土壤剖面不同层次间土壤养分的统计分析结果表明,人工林表层土壤养分中有有机质和速效磷的变异系数较大(表 2),约为 38%,碱

解氮和速效钾的变异系数次之,约为 34%,全氮的变异系数较小,为 30%,而全磷的变异系数最小,为 9%,与前人研究结论类似^[17-18]。表明环境因子(坡度、坡向、坡位等)对土壤有机质及速效养分的影响较大。

表 3 是人工林土壤剖面养分描述性统计。各种养分在剖面中的含量具有明显的层次性,表层(0—20cm)养分含量最高,向下逐渐降低。表层(0—

20cm)与下层养分含量差异极显著,而下层 20—40、40—60cm 间养分含量差异不显著。反映了植被对土壤养分的“表聚效应”。各种养分含量在剖面中的变异性也有明显差异。20—40cm 土壤养分的变异系数最小,表层(0—20cm)土壤养分的变异系数最大。表明植被及土壤环境因子主要对表层土壤养分产生影响。

表 3 人工林土壤剖面养分描述性统计
Table 3 Statistical description of soil nutrients in profile of planted forest land

土壤养分 Soil nutrient	深度(cm) Depth	样本数(n) Samples	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	Sd	CV%
全氮 TN (g/kg)	20	4	0.460	0.599	0.530 A	0.079	14.9
	40	4	0.274	0.323	0.298 B	0.026	8.8
	60	4	0.196	0.259	0.228 B	0.030	13.4
全磷 TP (g/kg)	20	4	0.452	0.628	0.563 A	0.077	13.6
	40	4	0.450	0.610	0.537 B	0.066	12.3
	60	4	0.450	0.620	0.538 B	0.070	13.0
有机质 OM(g/kg)	20	4	7.635	12.600	9.865 A	2.298	23.3
	40	4	4.366	5.461	4.932 B	0.449	9.1
	60	4	3.280	4.770	3.735 B	0.695	18.6
碱解氮 AN (mg/kg)	20	4	31.300	46.780	39.037 A	6.415	16.4
	40	4	17.500	37.420	22.648 B	9.854	13.5
	60	4	10.430	23.910	16.073 B	5.845	36.4
速效磷 AP (mg/kg)	20	4	1.340	1.850	1.597 A	0.237	14.9
	40	4	0.650	0.800	0.739 B	0.063	8.5
	60	4	0.560	0.990	0.727 B	0.191	26.2
速效钾 AK(mg/kg)	20	4	90.200	150.100	112.863 A	28.730	25.5
	40	4	55.800	69.200	61.525 B	5.867	9.5
	60	4	52.350	68.350	57.867 B	9.083	15.7

注:不同字母表示差异达 1% 显著水平。Different letters means significant at 1% level.

2.3 环境因子对土壤养分的影响

黄土丘陵区地貌复杂,地形破碎,不同坡向、坡位水分养分条件不同。本研究中将定性的坡位、坡向和地形因子赋以不同的编码,使其定量化。坡位以 1 表示上坡,2 表示中坡,3 表示下坡;坡向以 1 表示阴坡,2 表示阳坡;地形以 1 表示梁峁坡,2 表示沟坡。然后对各环境因子与养分之间进行相关分析(表 4)。各环境因子与养分之间的相关性未达到显著水平。但从总体上看,海拔、坡度、坡向与人工林地各土壤养分间呈负相关关系,即随海拔升高和坡度增大,土壤养分含量降低。阴坡养分含量大于阳坡。坡位、坡向与各土壤养分间呈正相关关系,即下坡养分含量大于上坡,沟坡养分含量大于梁峁坡。通常在黄土丘陵沟壑区,下坡位的土壤侵蚀较上坡

位轻,且下坡位能承接上坡位下来的径流和泥沙中的养分。阴坡水分条件较好,沟坡水分条件好于梁峁坡,加之沟坡人为干扰少,因此阴坡和沟坡植被生长状况较好,利于土壤养分积累。

2.4 不同利用年限土壤养分动态

土壤养分是林木生长的物质基础,土壤养分状况的好坏直接影响着林木生长速度及可持续性,而林木生长又反过来影响土壤的性质与养分状况,二者相互促进,互为动力。研究其动态变化对了解、预测人工林土壤养分的演化趋势具有重要的指导意义。本研究样地包括了刺槐 3~10 年幼龄林、10~20 年中龄林、20~30 年的近熟林以及生长 30~43 年的成熟林,反映了刺槐林生长过程中对土壤的培肥作用。从图 1 可见,随利用年限的增加,人工林地

土壤全氮、有机质、碱解氮和速效钾含量均增加,但方差分析表明,全氮、有机质和碱解氮的增加量不显著,而速效钾则每经过 10 年就有显著增加。全磷和速效磷含量则保持相对衡定的水平。由于全磷在凋

落物层中的含量很低,它们对土壤中全磷量的影响也很小,这使得土壤全磷和速效磷含量主要取决于它们在矿质土层中的含量^[13]。

表 4 环境因子与土壤养分间的相关系数

Table 4 Coefficient of environmental factors and soil nutrients

土壤养分 Soil nutrient	海拔(m) Altitude	坡度(°) Gradient	坡位 Position	坡向 Aspect	地形 Landform
全氮 TN (g/kg)	-0.3081	-0.0412	0.3437	-0.0230	0.2749
全磷 TP(g/kg)	-0.1698	-0.0056	0.0106	0.2805	-0.0201
有机质 OM(g/kg)	-0.2978	-0.0429	0.3167	-0.0396	0.3320
碱解氮 AN (mg/kg)	-0.2710	0.0840	0.2963	-0.0418	0.2257
速效磷 AP (mg/kg)	-0.0320	-0.0740	-0.0102	-0.1129	0.1382
速效钾 AK (mg/kg)	-0.2599	0.2171	0.1023	0.1804	0.0807

n = 29, r_{0.05} = 0.367

相关分析结果表明,人工林地土壤全氮、有机质、碱解氮和速效钾含量与利用年限之间具有极显著的相关性($r_{\text{全氮}} = 0.608^{**}$, $r_{\text{有机质}} = 0.578^{**}$, $r_{\text{碱解氮}} = 0.521^{**}$, $r_{\text{速效钾}} = 0.475^{**}$, n = 29, r_{0.01} = 0.470),而全磷和速效磷与利用年限之间相关性不

显著($r_{\text{全磷}} = 0.098$, $r_{\text{速效磷}} = 0.055$, n = 29, r_{0.01} = 0.367)。土壤全氮、有机质、碱解氮和速效钾含量与利用年限之间的相关关系可以用幂函数拟合(图 1)。

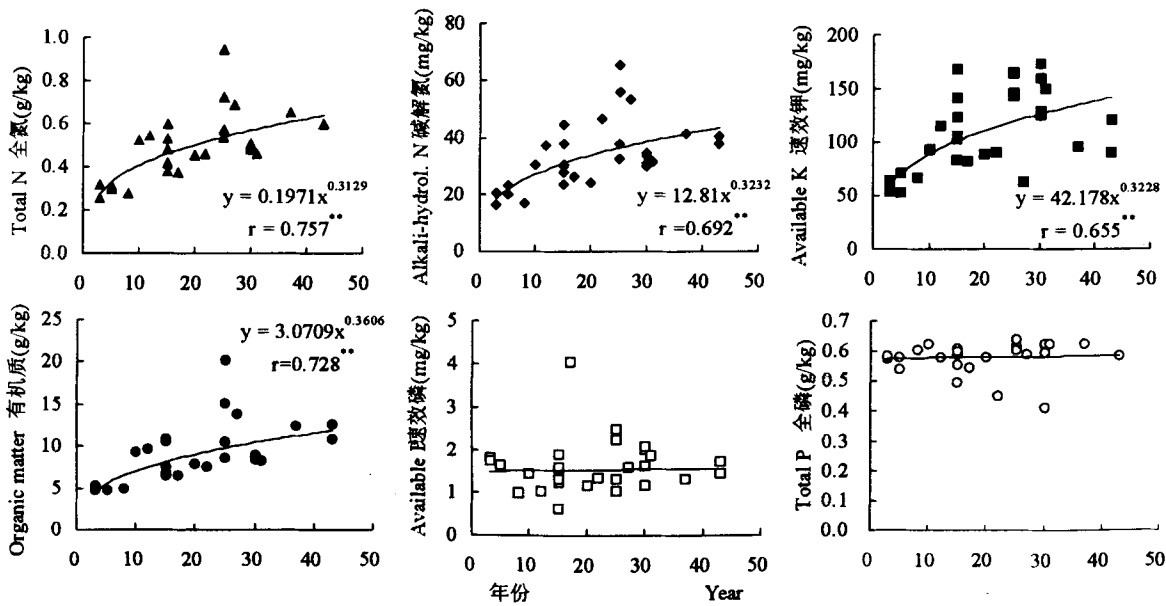


图 1 不同利用年限人工林土壤养分动态

Fig. 1 Soil nutrient dynamic in planted tree land during different land use years

为了综合评价人工林地土壤养分水平及其动态,本研究借助多元统计分析,计算了不同利用年限的土壤养分指数。即首先通过相对系数法将各养分量纲归一化,得到各个养分指标的隶属度值:

$$C_i = f_i / f_{max}$$

式中, C_i 是各个养分指标的隶属度值, f_i 是各个养分指标的原始值, f_{max} 是养分指标的最大值。

根据因子分析中各个养分指标的公因子方差值

确定其权重系数,最后计算各土壤的养分指数(SNI, Soil Nutrient Index)^[8]:

$$SNI = \sum_{i=1}^6 K_i \times C_i$$

式中, K_i 是各个养分指标的权重系数, C_i 是各个养分指标的隶属度值。

不同利用年限人工林土壤养分指数动态看出,随利用年限的增加,人工林地土壤养分指数含量相应增加。二者呈极显著的相关性($r=0.608^{**}$, $n=29$),可用幂函数分别进行拟合(图 2)。

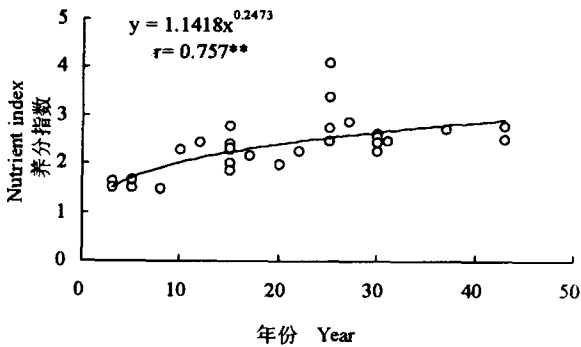


图 2 不同年限人工林土壤养分指数动态

Fig. 2 Soil nutrient index dynamic in planted tree land during different land use years

根据以上模型计算得出,黄土丘陵区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾及养分指数年增长率分别约为 0.0201%、0.0010%、0.6895mg/kg、2.2655mg/kg 和 0.04。据此估算,该区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮及养分指数^[19]约需 50 年、速效钾约需 30 年方可达到中上等养分水平。余作岳等^[11]研究认为,南方红壤区人工林土壤有机质含量约需 148 年可恢复到天然林水平。这与南方红壤区较黄土丘陵区水热条件优越,人工林及林下植被生长旺盛,土壤的自肥能力较强有关。

从以上分析结果可以得出,相对于林地开垦后的土壤肥力退化^[3-5],人工林土壤肥力恢复过程要漫长得多。可见,建设植被改造土壤生长条件是一个漫长的过程,刺槐的生长年限一般为 50 年,而且在黄土丘陵区由于土壤干层的形成,林分生长后期迅速衰败^[20],从土壤肥力恢复的角度对该林分的管理及后续林种的选择需要深入研究。尽管如此,黄土丘陵区人工林地仍有较强的自肥能力,其土壤养分的恢复在一定程度上是可能的。

3 结论

黄土丘陵区人工林土壤养分中除速效钾外,其它各养分含量均偏低,表明该区人工林土壤肥力处于低水平。人工林表层土壤养分中有机质和速效磷的空间变异性较大。各种养分在剖面中的含量具有明显的层次性,表层与下层养分含量差异极显著。这反映了植被对土壤养分的“表聚效应”。各种养分含量在剖面中的变异性也有明显差异。20—40cm 土壤养分的变异系数最小,0—20cm 土壤养分的变异系数最大。表明植被及土壤环境因子主要对表层土壤养分产生影响。

总体上看,海拔、坡度、坡向与人工林地各土壤养分间呈负相关关系,即随海拔升高和坡度增大,土壤养分含量降低。阴坡养分含量大于阳坡。坡位、坡向与各土壤养分间呈正相关关系,即下坡养分含量大于上坡,沟坡养分含量大于梁岭坡。表明环境因子对土壤养分有一定的影响。

随利用年限的增加,人工林地土壤全氮、有机质、碱解氮、速效钾含量及土壤养分指数均增加,与利用年限有极显著的相关性,可以用幂函数 $y = ax^b$ 模型进行拟合。但全氮、有机质和碱解氮的增加量不显著,而速效钾则每经过 10 年就有显著增加。全磷和速效磷含量则保持相对衡定的水平。黄土丘陵区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾及养分指数年增长率分别约为 0.20g/kg、0.01 g/kg、0.69mg/kg、2.27mg/kg 和 0.04。该区人工林地土壤有机质、全氮、碱解氮及养分指数约需 50 年、速效钾约需 30 年才能达到中上等养分水平。

参考文献:

- [1] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 70-117.
- [2] 常庆瑞, 安韶山, 刘京, 等. 黄土高原恢复植被防止土地退化效益研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 6-9.
- [3] 查轩, 黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 109-114.
- [4] 史衍玺, 唐克丽. 林地开垦加速侵蚀下土壤养分退化的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 26-33.
- [5] 郑粉丽. 子午岭林区植被破坏与恢复对土壤演变的影响[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 41-44.
- [6] 张全发. 植物群落演替与土壤发育之间的关系[J]. 武汉植物学研究, 1990, 8(4): 325-334.
- [7] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 II. 化学和生物学肥力的演化[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 1-6.

- [8] 张庆费, 宋永昌, 由文辉. 浙江天童常绿阔叶林主要演替阶段凋落物与土壤肥力的关系 [J]. 生态学报, 1999, 19(2): 174-178.
- [9] 张庆费, 由文辉, 宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 19-22.
- [10] Parrish A G *et al.* Responses of plants from three successional communities on a nutrient gradient [J]. J. Ecol., 1982, 70: 233-248.
- [11] 马祥庆, 范少辉, 刘爱琴, 等. 不同栽植代数杉木人工林土壤肥力的比较研究 [J]. 林业科学研究, 2000, 13(6): 577-582.
- [12] 吴蔚东, 张桃林, 高超, 等. 红壤地区杉木人工林土壤肥力质量性状的演变 [J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 285-294.
- [13] 李瑞雪, 薛泉宏, 杨淑英, 等. 黄土高原沙棘、刺槐人工林对土壤的培肥效应及其模型 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4 (1): 14-21.
- [14] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 233-243.
- [15] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [16] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 125-135.
- [17] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west taiwan soils [J]. Soil Sci., 1997, 162: 291-298.
- [18] 曹慧, 杨浩, 孙波, 等. 太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异 [J]. 土壤, 2002(4): 201-205.
- [19] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力评价 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1367-1371.
- [20] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探 [J]. 中国水土保持, 1999(5): 11-14.