第54卷第2期
2017年3月

土　壤　学　报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 54，No. 2
Mar.，2017

DOI：10.11766/trxb201605250124

西藏人工造林作业区土壤养分特征研究*

罗　红[1, 2]　吴建普[2]　边巴多吉[2]　嘎玛群宗[2]　朱雪林[2†]

（1中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091）

（2西藏自治区林业调查规划研究院，拉萨 850000）

摘　要　为了掌握西藏拟造林作业区的土壤养分状况，对6个地市524个造林作业区的土壤样本进行了养分测定和分析。结果表明：（1）土壤全钾、有效磷、有机质和速效钾均处在“稍缺—极缺”水平：平均含量分别为6.26 g kg^{-1}、8.7 mg kg^{-1}、17.81 g kg^{-1}和83.6 mg kg^{-1}，全氮和全磷处在“中等—稍缺”水平：平均含量分别为1.39 g kg^{-1}和0.72 g kg^{-1}，碱解氮条件最好：平均含量为214.1 mg kg^{-1}，全钾条件最差。（2）6地市除碱解氮外，土壤中分别存在2至5个养分元素的缺乏，多数作业区全钾、速效钾和有效磷不足。阿里地区最缺有机质，仅5.08 g kg^{-1}，日喀则市、拉萨市和林芝市最缺全钾，仅5.19 ~ 6.42 g kg^{-1}，山南市和昌都市最缺有效磷，仅3.9 ~ 5.4 mg kg^{-1}。此外，拉萨市、山南市和阿里地区多数作业区全氮不足，阿里地区、日喀则市和昌都市全磷不足，除昌都市外各地市有机质不足的作业区居多。（3）地市间土壤养分含量差异显著，但速效钾、有机质在日喀则市、拉萨市和山南市间差异均不显著。总体而言，西藏造林作业区土壤养分状况较差，通过对西藏造林作业区土壤养分的特征分析，可为作业区造林后树木生长状态的成因查寻提供科学依据，为进一步提高造林质量提供基础数据。

关键词　土壤养分；造林；作业区；人工林；西藏；地市

中图分类号　S158.3；S725　　**文献标识码**　A

土壤养分提供了植物生长所必需的营养元素，决定着植物的生长状况，其含量又直接影响林木的生长发育，土壤养分的匮乏是制约树木生长的重要原因[1-3]。在全球气候变化的背景下，扩大森林面积被认为是增汇减排的重要措施[4-5]，而推动人工造林的发展是中国应对气候变化国家方案中的一条重要措施[6]。人工造林作为扩大森林资源和改善生态环境重要途径，被认为是吸收二氧化碳、减缓气候变暖最有效且最具生态效应的碳增汇方法之一[7-8]，人工林对生态环境具有重要价值和意义，其研究多年来一直是热点，如作业区立地类型的评价和划分[9-10]、影响造林树种的生长因素[2, 11]、人工林作为森林具有的各种生态功能及其影响等方面[12-14]。但人工造林研究多局限于造林后，造林前影响人工林生长的潜在因素，特别是人工造林与土壤潜在关系的研究甚少。

西藏是国家重要的生态安全屏障，人工造林是西藏建设生态安全屏障的主要方式。近年来，西藏大力开展了雅鲁藏布江、怒江、拉萨河、年楚河、雅砻河和狮泉河（两江四河）流域造林工作，预计今后每年投入人工造林的资金将达到数亿乃至数十亿元，人工造林成效是评定投资绩效的唯一标准。掌握并改善作业区的土壤养分状况，有利于提高造林成活率和林木的健康等级，是推动造林技术提高的重要手段，对稳固西藏生态安全屏障建设工作具有重要意义。本研究对“西藏自治区2016年度重点

* 西藏自治区2016年度重点区域生态公益林建设工程项目 Supported by the Construction Program of Ecological Public Welfare Forests of 2016 in the Tibet Autonomous Region

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：zxllsxz@163.com

作者简介：罗　红（1984—），女，湖南湘潭人，博士研究生，主要从事森林经理、生态学研究。E-mail：luohong841014@sina.com

收稿日期：2016-05-25；收到修改稿日期：2016-10-07；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2016-11-04

区域生态公益林建设工程”6个地市造林作业区的土壤养分进行测定和分析，其结果能够为西藏人工造林作业提供设计依据，能够促进西藏人工造林技术的提升，丰富造林前作业区的土壤养分研究，为造林后树木生长状态的成因查寻提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

西藏位于中国西部、青藏高原西南部，地理坐标26°50′～36°29′N、78°15′～99°07′E，面积约123 万km^2，平均海拔4 000 m以上，总地势西北高东南低，具有较明显的季风气候性质，相对高差大，气候垂直变化明显。西藏人工造林作业区主要分布在两江四河流域的河谷滩地、阶台地、冲积地和山地缓坡上。西藏北部主要为草原荒漠生态系统，基本无人工造林，植被以耐寒抗风的高山草类和灌木类植物占优势；中西部主要为干旱半干旱地区，造林树种以杨树、柳树、榆树和灌木树种为主，而东部和东南部的林区造林树种则以针叶树为主。

1.2　数据来源及因子确定

外业调查确定作业区后，在作业区内部选取土壤状况最具代表性的区域进行土壤取样。根据造林栽植穴设计深度，土壤样本一般选取0～80 cm深的土壤剖面混合土样，土层厚度不及80 cm深的地区，土样为至最底层的土壤剖面混合土样，一个作业区取一份样本。土壤样本涉及西藏6个地市，在40余名工作人员及各地市县林业局工作人员的共同参与下完成，外业调查历时2个月（2015年6—8月），涉及524个造林作业区（图1）。

由于研究区域广，土样多，测定工作量大，选取土壤养分中与植物生长所需的大量元素氮（N）、磷（P）、钾（K）有密切关系的有机质（Organic matter，OM）、全氮（Total nitrogen，TN）、全磷（Total phosphorus，TP）、全钾（Total potassium，TK）、碱解氮（Alkaline nitrogen，AN）、有效磷（Available phosphorus，AP）、速效钾（Readily available potassium，AK）以及pH 等8个养分因子进行测定。

1.3　测定方法

将取好的土样放入自封袋中带回实验室，置于通风处自然风干，之后研磨、过筛，备用。土壤养分分析采用常规方法[15-16]测定：用酸度计测定pH，重铬酸钾氧化—容量法测定土壤有机质含量，半微量凯氏定氮法测定全氮含量，氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定全磷含量，氢氧化钠熔融—

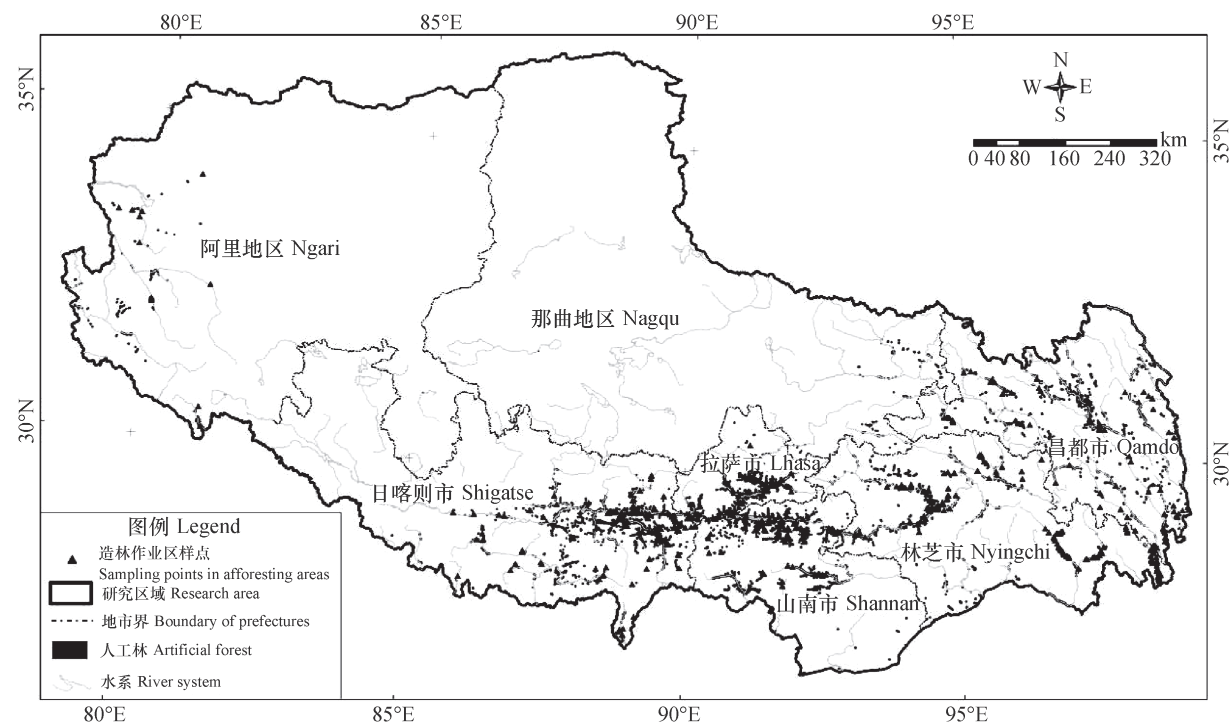

图1　西藏造林作业区土壤采样点分布图

Fig. 1　Distribution of soil sampling points in the afforesting areas of Tibet

火焰光度法测定全钾含量，碱解扩散法测定碱解氮含量，碳酸氢钠浸提—分光光度法测定有效磷含量，乙酸铵浸提—火焰光度法测定速效钾含量。

1.4　数据处理

运用Excel 2010和SPSS 18.0软件，对试验数据进行统计与分析，采用Kolmogorov-Smirnov Test（柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验）分析数据的分布类型、Spearman（斯伯曼/斯皮尔曼）相关性分析方法分析土壤养分因子之间的相关性，运用Kruskal Wallis Test（克鲁斯卡尔-沃利斯检验）和中值检验比较造林作业区土壤养分在西藏6地市的差异，并进一步采用Mann-Whitney U Test（曼-惠特尼U检验）分析养分因子在两两地市之间的差异。结合全国第二次土壤普查养分分级标准[17-18]（表1），对养分测定值进行土壤养分分级，计算算术平均值并分析其特征。

表1　土壤养分分级标准与丰缺指标

Table 1　Criteria for grading of soil nutrient status（GSNS）and index of abundance degree（IAD）

养分分级 Grade of soil nutrient status	丰缺度 Abundance degree	TN（$g\ kg^{-1}$）	TP（$g\ kg^{-1}$）	TK（$g\ kg^{-1}$）	AN（$mg\ kg^{-1}$）	AP（$mg\ kg^{-1}$）	AK（$mg\ kg^{-1}$）	OM（$g\ kg^{-1}$）
1	丰Abundant	>2	>1	>25	>150	>40	>200	>40
2	稍丰Slightly abundant	1.5 ~ 2	0.8 ~ 1	20 ~ 25	120 ~ 150	20 ~ 40	150 ~ 200	30 ~ 40
3	中等Medium	1 ~ 1.5	0.6 ~ 0.8	15 ~ 20	90 ~ 120	10 ~ 20	100 ~ 150	20 ~ 30
4	稍缺Slightly deficient	0.75 ~ 1	0.4 ~ 0.6	10 ~ 15	60 ~ 90	5 ~ 10	50 ~ 100	10 ~ 20
5	缺Deficient	0.5 ~ 0.75	0.2 ~ 0.4	5 ~ 10	30 ~ 60	3 ~ 5	30 ~ 50	6 ~ 10
6	极缺Extremely deficient	<0.5	<0.2	<5	<30	<3	<30	<6

注：TN代表全氮，TP代表全磷，TK代表全钾，AN代表碱解氮，AP代表有效磷，AK代表速效钾，OM代表有机质，下同 Note: TN stands for total nitrogen，TP for total phosphorus，TK for total potassium，AN for alkaline nitrogen，AP for available phosphorus，AK for readily available potassium，and OM for organic matter. The same below

2　结　果

2.1　造林作业区土壤养分现状及特征

西藏人工造林作业区的土壤养分现状见表2。

全区造林作业区土壤各养分分级均值在1.88 ~ 5.28之间（表2和图2），其中全钾、有效磷、有机质和速效钾丰缺度均为“稍缺—极缺”水平，缺乏程度表现为全钾 > 有效磷 > 有机质 > 速效钾。碱解氮的养分分级均值最小，其养分平均含量（算术平均值）为214.1 $mg\ kg^{-1}$，为“丰—稍丰”水平，该养分的状况最好。全氮和全磷平均含量分别为1.39 $g\ kg^{-1}$、0.72 $g\ kg^{-1}$，养分分级均值分别为3.14和3.15，为“中等—稍缺”水平。有效磷、速效钾和有机质平均含量分别为8.9 $mg\ kg^{-1}$、83.6 $mg\ kg^{-1}$和17.81 $g\ kg^{-1}$，养分分级均值分别为4.79、4.19、4.23，为“稍缺—缺”水平。而全钾平均含量为6.26 $g\ kg^{-1}$，养分分级均值最大，为5.28，处于“缺—极缺”水平，条件最差。

西藏造林作业区土壤养分的变化幅度：有效磷变化范围的倍率最大，极大值225.9 $mg\ kg^{-1}$约为极小值0.1 $mg\ kg^{-1}$的2 259倍，其次依次为有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、全钾和pH；有效磷的变异系数也最大，为219%，其次依次为有机质、速效钾、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和pH，pH的变异系数和变化范围倍率均最小。

全区造林作业区土壤pH算术平均值为6.99，中数为7.01，表明大部分造林地土壤酸碱度呈中性。

从数据分布类型来看：pH呈正态分布，其背景值为6.98，全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾和有机质呈对数正态分布，其背景值分别为1.19 $g\ kg^{-1}$、0.62 $g\ kg^{-1}$、5.61 $g\ kg^{-1}$、176.6 $mg\ kg^{-1}$、61.5 $mg\ kg^{-1}$和11.13 $g\ kg^{-1}$，而有效磷呈偏态分布，背景值应取正态转换后的算术平均值，因多种转换后失败，未计算其背景值。中值反映了50%以上作业区的数量特征，pH的中值大于背景值，表明多数作业区pH高于背景值；全氮、全磷和全钾的中值大于背景值，表明全氮、全磷和全钾的状况好于

表2 造林作业区土壤养分现状统计值

Table 2 Statistics of soil nutrient status of the afforesting areas（*n*=524）

统计项 Statistical items	TN （g kg^{-1}）	TP （g kg^{-1}）	TK （g kg^{-1}）	AN （mg kg^{-1}）	AP （mg kg^{-1}）	AK （mg kg^{-1}）	OM （g kg^{-1}）	pH
极小值 Min	0.16	0.03	1.20	18.7	0.1	11.5	0.20	5.23
极大值Max	21.17	2.96	18.19	1 855.5	225.9	828.3	394.0	9.03
中值 Median	1.12	0.66	5.68	173.7	3.7	57.7	10.71	7.01
算术平均值Arithmetic mean	1.39	0.72	6.26	214.1	8.7	83.6	17.81	6.98
标准差Standard deviation	1.18	0.38	2.97	148.5	19.0	89.0	25.61	0.71
变异系数Coefficient of variation（%）	84.6	52.6	47.4	69.3	219.0	106.4	143.8	10.2
几何均值Geometric mean	1.19	0.62	5.61	176.6	3.4	61.5	11.13	6.95
背景值Background value	1.19	0.62	5.61	176.6		61.5	11.13	6.98
养分分级均值Mean-GSNS	3.14	3.15	5.28	1.88	4.79	4.19	4.23	

注：养分分级均值无量纲。对数正态分布数据取几何均值为背景值，正态分布数据取算术平均值为背景值，偏态分布数据以正态转换后的均值为背景值[19]，统计样本数为524个Note：The mean values for grading of soil nutrient status is dimensionless. The data of Log-normal distribution set geometric mean value as background value；the data of normal distribution set arithmetic mean value as background value；while the data of skewed distribution set normalized mean value as background value[19]. The statistics covers a total of 524 soil samples

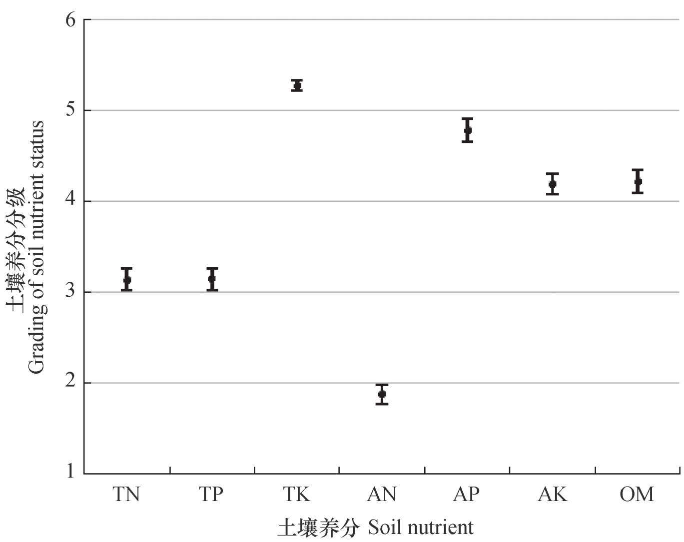

图2 造林作业区土壤养分分级均值及其95%置信区间

Fig. 2 Mean values for grading of soil nutrient status of the afforesting areas and with confidence interval being 95%

背景值；碱解氮和速效钾的中值小于背景值，表明碱解氮和速效钾的状况较背景值劣。多数呈对数正态分布的养分因子，其几何均值较算术平均值更接近中值，几何均值更能反应养分状态。

2.2 土壤养分因子间的相关性

西藏造林地土壤养分8因子按照两两一组形成28组关系（表3），并有24组达到了显著、极显著水平，其相关系数的绝对值在0.101 ~ 0.637之间。有机质与全氮间的相关系数最大，为0.637，为极显著的正相关。碱解氮和有效磷间的相关系数最小，为0.101，为显著的极弱正相关。全磷、碱解氮和速效钾分别与其他7个养分因子间存在相关性；有机质与其他6个养分因子间存在相关性；全钾、pH与其他5个养分因子间存在相关性；与有

表3　造林作业区土壤养分因子相关性

Table 3　Correlations between soil nutrient factors in the afforesting areas（*n*=524）

统计项 Statistical items	TN	TK	TP	AN	AP	AK	OM	pH	相关因子数 Correlation factors
TN	1	0.307**	0.244**	0.548**	0.118**	0.396**	0.637**	–0.214**	7
TK		1	0.140**	0.126**	–0.021	0.122**	0.318**	–0.044	5
TP			1	0.301**	0.115**	0.355**	0.404**	–0.410**	7
AN				1	0.101*	0.426**	0.621**	–0.311**	7
AP					1	0.270**	0.083	–0.028	4
AK						1	0.580**	–0.329**	7
OM							1	–0.306**	6
pH								1	5

注：*n*代表样本数；**表示在 0.01 水平（双侧）上显著相关；*表示在 0.05 水平（双侧）上显著相关，下同；“相关因子数”仅统计达到了0.01极显著和0.05显著水平的相关因子个数Note：“*n*” stands for number of samples. The values in the table are correlation coefficients. ** means significant correlation at 0.01 level（both sides）.* means significant correlation at 0.05 level（both sides）.The same below. The number of correlation factors only counts number of related factors significant at 0.01 and 0.05 levels

效磷有相关性的养分因子数最少，但也有4个（表3），表明土壤中各养分因子的含量均与其他因子间存在不同程度的关系，且关系复杂，相关系数绝对值越大两者间的相互影响越强烈。

24组显著关系中除pH与其他5个养分因子表现为显著负相关外，其他19组关系均为正相关。pH与其他5个养分因子的相关系数在–0.410 ~ –0.214之间，与全磷间相关系数绝对值最大，两者间存在极显著的中度负相关，表明pH对全磷的影响最为强烈；而pH与全氮、碱解氮、速效钾和有机质之间为极显著的弱负相关，表明pH对此类养分因子有较弱影响。pH和养分因子的负相关性表明在西藏造林作业区中pH越低的区域养分状况越好，pH越高的作业区中相对应土壤养分含量越低。从表3可知，除pH外的19组关系的相关系数均为正值，表明养分因子间存在正向影响。有机质—全氮、有机质—碱解氮间为极显著的强正相关（相关系数大于0.6），表明土壤有机质与全氮、碱解氮的关系密切，有机质的升高将伴随较显著的全氮和碱解氮增加。全氮—碱解氮、全磷—有机质、速效钾—有机质、碱解氮—速效钾间表现为极显著的中度正相关（相关系数0.4 ~ 0.6），其他10组关系表现为极显著的弱正相关，3组表现为显著或极显著的极弱相关，反映了养分因子间相互影响程度的不同。

西藏土壤养分因子的相关性取决于各地市的主导相关性因子组，在6个地市中相关系数最高和次高的关系组分别为有机质—全氮（OM—TN）和有机质—碱解氮（OM—AN），出现频次最高，均为3次，决定了全区的相关因子主导组为这两个组类（表3）。

2.3　地区间土壤养分差异性

2.3.1　含量和丰缺程度的差异性　从6地市造林作业区土壤养分现状来看（表4和图3），阿里地区造林作业区pH均值为8.17，土壤呈弱碱性，土壤中全氮、全钾和有机质平均含量分别为0.82 g kg^{-1}、6.29 g kg^{-1}和5.08 g kg^{-1}，丰缺度均为“稍缺—极缺”的水平，缺乏程度为有机质 > 全钾 > 全氮，有机质最缺。日喀则市造林作业区pH均值为7.39，土壤呈中性–弱碱性，土壤中全磷、全钾、有机质、有效磷和速效钾含量分别为0.47 g kg^{-1}、5.19 g kg^{-1}、9.55 g kg^{-1}、4.6 mg kg^{-1}和46.2 mg kg^{-1}，为“稍缺—极缺”的水平，缺乏程度为全钾 > 有效磷

表4 各地市造林作业区土壤养分现状

Table 4 Soil nutrient status quo of the afforesting areas in each prefecture

区域 Region	样本数 Number of samples	值 Value	TN (g kg^{-1})	TP (g kg^{-1})	TK (g kg^{-1})	AN (mg kg^{-1})	AP (mg kg^{-1})	AK (mg kg^{-1})	OM (g kg^{-1})	pH
阿里地区 Ngari	13	均值 Mean	0.82	0.67	6.29	93.5	12.0	85.7	5.08	8.17
		中数Median	0.73	0.48	6.79	97.4	9.8	81.3	4.07	8.23
		标准差Standard deviation	0.24	0.43	2.12	38.1	10.8	35.7	2.34	0.33
		养分分级均值 Mean-GSNS	4.46	3.46	5.23	3.46	3.69	3.85	5.69	
日喀则市 Shigatse	151	均值 Mean	1.20	0.47	5.19	190.8	4.6	46.2	9.55	7.39
		中数Median	1.04	0.44	4.63	149.1	3.8	37.1	8.36	7.40
		标准差Standard deviation	0.57	0.21	2.58	123.7	5.3	32.3	8.90	0.52
		养分分级均值 Mean-GSNS	3.34	4.14	5.51	2.15	5.02	4.9	4.92	
拉萨市 Lhasa	44	均值 Mean	0.91	0.60	5.68	145.3	8.7	49.0	9.56	7.27
		中数Median	0.80	0.62	5.43	122.2	4.5	46.6	7.85	7.16
		标准差Standard deviation	0.40	0.21	2.68	91.8	17	26.1	7.30	0.55
		养分分级均值 Mean-GSNS	4.02	3.57	5.34	2.52	4.59	4.82	4.89	
山南市 Shannan	81	均值 Mean	1.06	0.74	6.68	163.6	3.9	46.4	9.54	6.77
		中数Median	0.92	0.75	6.52	134.4	2.2	37.3	8.29	6.78
		标准差Standard deviation	0.51	0.17	2.77	91.3	5.5	31.9	7.05	0.43
		养分分级均值 Mean-GSNS	3.68	2.80	5.20	2.15	5.31	4.95	4.85	
林芝市 Nyingchi	169	均值 Mean	1.74	0.95	6.42	287.6	15.6	139.6	29.73	6.47
		中数Median	1.43	0.92	5.57	256.7	4.8	98.1	17.87	6.55
		标准差Standard deviation	1.78	0.41	2.86	189	29.9	127.9	37.79	0.60
		养分分级均值 Mean-GSNS	2.64	2.25	5.26	1.34	4.32	3.23	3.31	
昌都市 Qamdo	66	均值 Mean	1.76	0.71	8.18	211.1	5.4	94.4	24.34	7.21
		中数Median	1.67	0.60	7.78	197.8	2.1	85.8	20.53	6.94
		标准差Standard deviation	0.93	0.45	3.53	95.3	8.6	55.4	23.86	0.76
		养分分级均值 Mean-GSNS	2.47	3.27	4.88	1.58	5.15	3.74	3.5	

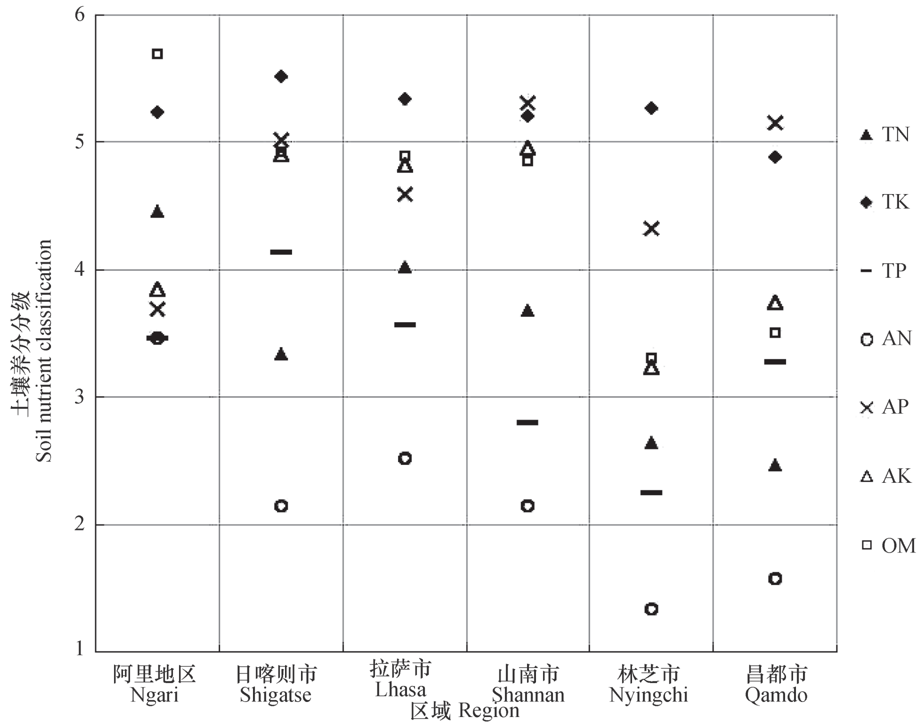

图3　各地市造林作业区土壤养分分级均值

Fig. 3　Means for grading of soil nutrient status of the afforesting areas in each prefecture

＞有机质＞速效钾＞全磷，全钾和有效磷最缺。拉萨市造林作业区pH均值为7.27，土壤呈中性—弱碱性，土壤中全氮、全钾、有机质、有效磷和速效钾（均值）含量分别为0.91 g kg^{-1}、5.68 g kg^{-1}、9.56 g kg^{-1}、8.7 mg kg^{-1}和49.0 mg kg^{-1}，为“稍缺—极缺”的水平，缺乏程度表现为全钾＞有机质＞速效钾＞有效磷＞全氮，全钾最缺。山南市造林作业区pH均值为6.77，土壤呈中性，土壤中全钾、有机质、有效磷和速效钾含量分别为6.68 g kg^{-1}、9.54 g kg^{-1}、3.9 mg kg^{-1}和46.4 mg kg^{-1}，为“稍缺—极缺”的水平，缺乏程度表现为有效磷＞全钾＞速效钾＞有机质，有效磷和全钾最缺。林芝市造林作业区pH均值为6.47，土壤呈中性-弱酸性，土壤中全钾和有效磷含量分别为6.42 g kg^{-1}、15.6 mg kg^{-1}，为“缺—极缺”的水平，全钾最缺。昌都市造林作业区pH均值为7.21，土壤呈中性，土壤中全钾和有效磷含量分别为8.18 g kg^{-1}、5.4 mg kg^{-1}，两者均处在“缺—极缺”的水平，有效磷最缺。

2.3.2　测定值的差异性检验　　通过Kruskal Wallis检验和中值检验，6地市土壤养分因子的概率值（渐近显著性）均小于0.001，小于显著性水平0.01，两种方法检验结果一致，表明8个养分因子在各地市间存在极显著差异。采用Mann-Whitney U检验对地市间的养分差异性进一步检验分析（表5），表中120个渐近显著性值中80个值小于0.05，表明各地市间2/3的检验已达了显著水平以上，地市间的养分含量具有显著差异性。

从地市角度来看，日喀则市—林芝市、日喀则市—昌都市8养分因子均表现为地市间的显著差异，而拉萨市—山南市之间仅有全钾、全磷、有效磷和pH表现为显著差异，表明拉萨市和山南市的造林作业区养分状况较为接近。其余各地市组合差异不显著的养分因子为1～3个，大部分养分因子在地市间表现为显著差异。

从养分因子角度来看，pH在地市间的差异最为明显，仅拉萨市—昌都市差异不显著；全钾在地市间的差异最不明显，15组地市组合有7组差异不显著，主要是阿里地区与其他地市的组合；速效钾在5个地市组合中差异不显著；全氮、全磷和有机质在4个地市组合中差异不显著；有效磷在3个地市组合中差异不显著；碱解氮仅在日喀则市—山南市、拉萨市—山南市2个地市组合中不显著，表明大部分养分因子在地市间仍是差异显著。

从地理区位的相邻性质看，阿里地区—日喀则

表5 地市间造林作业区土壤养分的差异性检验

Table 5 Difference tests of the afforesting areas in soil nutrient between prefectures

检验组合 Test groups	曼-惠特尼U检验 Mann-Whitney U Test							
	TN	TK	TP	AN	AP	AK	OM	pH
阿里地区—日喀则市 Ngari-Shigatse	0.006**	0.042*	0.069	0.001**	0.000**	0.000**	0.014*	0.000**
阿里地区—拉萨市 Ngari-Lhasa	0.506	0.278	0.732	0.048*	0.011*	0.001**	0.018*	0.000**
阿里地区—山南市 Ngari-Shannan	0.096	0.797	0.018*	0.002**	0.000**	0.000**	0.016*	0.000**
阿里地区—林芝市 Ngari-Nyingchi	0.000**	0.758	0.002**	0.000**	0.068	0.092	0.000**	0.000**
阿里地区—昌都市 Ngari-Qamdo	0.000**	0.066	0.504	0.000**	0.000**	0.832	0.000**	0.000**
日喀则市—拉萨市 Shigatse-Lhasa	0.001**	0.270	0.000**	0.021*	0.028*	0.330	0.956	0.028
日喀则市—山南市 Shigatse-Shannan	0.043*	0.000**	0.000**	0.240	0.004**	0.438	0.892	0.000**
日喀则市—林芝市 Shigatse-Nyingchi	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.003**	0.000**	0.000**	0.000**
日喀则市—昌都市 Shigatse-Qamdo	0.000**	0.000**	0.000**	0.027*	0.010*	0.000**	0.000**	0.000**
拉萨市—山南市 Lhasa-Shannan	0.103	0.026*	0.000**	0.120	0.000**	0.179	0.918	0.000**
拉萨市—林芝市 Lhasa-Nyingchi	0.000**	0.095	0.000**	0.000**	0.845	0.000**	0.000**	0.000**
拉萨市—昌都市 Lhasa-Qamdo	0.000**	0.000**	0.649	0.000**	0.001**	0.000**	0.000**	0.123
山南市—林芝市 Shannan-Nyingchi	0.000**	0.280	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
山南市—昌都市 Shannan-Qamdo	0.000**	0.009**	0.004**	0.000**	0.913	0.000**	0.000**	0.001**
林芝市—昌都市 Nyingchi-Qamdo	0.259	0.000**	0.000**	0.002**	0.000**	0.006**	0.643	0.000**

注：表中数值为渐近显著性；**表示在0 .01 水平（双侧）上显著差异；*表示在 0.05 水平（双侧）上显著差异 Note：The values in the table means asymptotic significance. **means significant difference at 0.01 level（both sides）. * means significant difference at 0.05 level（both sides）

市相邻但仅全磷表现为差异不显著；而日喀则市—拉萨市间全钾、速效钾、有机质和pH均表现为无差异；日喀则市—山南市间碱解氮、速效钾和有机质均表现为无差异；拉萨市—山南市间全氮、碱解氮、速效钾和有机质均表现为无差异；相邻的山南市—林芝市间仅全钾无差异，林芝市—昌都市间仅全氮和有机质无差异。可见，日喀则市、拉萨市、山南市速效钾和有机质具有更多的地理共性，在3地市间无差异。

表6描述了6地市作业区中土壤养分分级占作业区数量最多的养分等级的分级类型及其占样本的比例。从养分因子来看，全氮各地市主导等级

表6　各地市土壤养分分级最高频率级分布

Table 6　Distribution of highest frequency grades of soil nutrients in each prefectures

频率最高养分等级 The highest percentage class of GSNS		阿里地区 Ngari	日喀则市 Shigatse	拉萨市 Lhasa	山南市 Shannan	林芝市 Nyingchi	昌都市 Qamdo
TN	分级类型GSNS	5	3	4	4	3	1
	比例Percentage（%）	53.9	29.1	34.1	33.3	27.2	33.3
TP	分级类型GSNS	4	4	3	3	1	4
	比例Percentage（%）	46.2	35.1	45.5	45.7	39.1	27.3
TK	分级类型GSNS	5	6	6	5	5	5
	比例Percentage（%）	76.9	56.3	45.5	58.0	52.1	53.0
AN	分级类型GSNS	3	1	1	1	1	1
	比例Percentage（%）	38.5	49.7	29.6	38.3	78.7	71.2
AP	分级类型GSNS	4	6	5	6	6	6
	比例Percentage（%）	38.5	38.4	34.1	64.2	35.5	65.2
AK	分级类型GSNS	4	5	4	6	4	4
	比例Percentage（%）	46.2	42.4	38.6	37.0	42.6	36.4
OM	分级类型GSNS	6	6	6	6	4	3
	比例Percentage（%）	76.9	33.8	34.1	33.3	37.9	24.2

注：土壤养分分级类型的丰缺度表示同表1 Note：Abundance degree for each grade of soil nutrient status is the same as Table 1

类型有4种：昌都市“稍丰”、日喀则市和林芝市“中等”、拉萨市和山南市“稍缺”、阿里地区“缺”作业区最多，占27%～54%；全磷以林芝市“丰”、拉萨市和山南市“中等”、其他3地市“稍缺”作业区最多，占27%～47%；碱解氮以阿里地区“中等”、其他5地市“丰”作业区数量最多，占30%～79%；全钾最高频率级养分等级在各地市主要为“缺”和“极缺”类型，表明该类型作业区数量最多（比例最高），日喀则市和拉萨市以“极缺”作业区最多，其他4地市以“缺”类型作业区最多，占45%～77%；有效磷在各地分布的主导等级为阿里地区“稍缺”、拉萨市“缺”、其他4地市“极缺”作业区所占比例最高，占34%～66%；速效钾各地市主导等级为山南市“极缺”、日喀则市“缺”、其他4地市“稍缺”，占36%～47%；有机质以昌都市“中等”、林芝市“稍缺”、其他4地市“极缺”作业区最多，占24%～77%。作业区养分等级“稍缺”至“极缺”均可认为该养分元素的不足，反之不缺，则各地市中全钾表现为不足的作业区数量最多，全氮不足的作业区以拉萨市、山南市和阿里地区数量最多，全磷在阿里地区、日喀则市和昌都市不足作业区居多，各地市多数作业区不缺碱解氮，6地市多数作业区速效钾不足，且山南市表现为速效钾“极缺”，有效磷在各地市均以不足作业区占多，且有4个地市表现为“极缺”。

3　讨　论

3.1　西藏造林作业区土壤养分的空间分布

西藏土壤的地带性分布、成土过程的强弱、生物量的积累以及地形和气候的变化等造成了地市间土壤养分含量的差异性。西藏土壤类型沿两江四河流域，由最西北狮泉河流域经林芝市向最东边怒江流域（海拔逐渐降低）具有显著的地带性[20]，造林作业区土壤养分特征在地市间的变化基本符合土壤地带性变化，土壤pH自西北向东南不断降低（林芝市最低）而至昌都市又有升高，土壤氮、磷、钾等养分含量也自西北向东南总体呈增加趋势。拉萨市造林作业区土壤养分含量普遍偏低、土壤pH呈碱性反应，与普布次仁等[21]研究的拉萨市周边困难造林地土壤养分分析结果一致。日喀则市主要造林作业区位于非有林县，属于非森林土壤，土壤pH呈中性或碱性，全磷含量较低、氮含量较

高，前期有类似研究结果[22]。山南市猴子山宜林地土壤质量评价结果显示，有机质、氮、磷和钾等养分含量偏低[23]，与本研究山南市结果吻合。林芝市植被资源丰富，土壤有机质含量高，全氮含量较丰富，全钾含量高，速效钾丰富，全磷富积，但有效磷含量属中下水平[24]，本研究造林地作业区的养分状况除钾元素外基本符合此类特征。

土壤养分含量、pH与土壤成土过程密切相关，是气候、生物、地形和成土母质等多种因素共同作用的结果[1，17，20，25]。本研究造林作业区基本为宜林地，地表多以草本植物为主，自西北向东南依次经历了温带干旱、半干旱和半湿润气候区[26]，水热条件组合逐渐变好，土壤有机质积累有显著变化。西藏土壤越干燥有机质含量越低，降水量越多有机质越多，高山海拔达到一定高度时土壤有机质显著降低[17]；阿里地区降水最少、平均海拔4400 m，土壤最缺乏有机质；林芝市水热条件好，土壤有机质相对较高。降水量的多少与气候的干湿度直接影响土壤的酸碱度[20]，干旱区的阿里地区pH最高，大于8，半干旱区的日喀则市和拉萨市土壤pH大于7，半湿润、湿润的林芝市造林作业区土壤pH最小，多小于7。

3.2 造林树种与土壤养分的关系

西藏造林树种主要分为杨树、柳树、榆树、针叶树和灌木等5大类，人工造林基本为生态防护林，对林木产品少有要求。杨树、柳树和榆树均具有生长快、适应性强和耐寒的特性，在日喀则市、拉萨市和山南市种植面积较大，且3类树种具有耐盐碱的特性，3地市土壤pH均值在6.77至7.39之间，多数造林作业区土壤酸碱性不会成为树木生长的限制因子。树木生长离不开土壤养分的供应，生长速度快的树种，土壤养分需求会更多[27-28]。杨树等3类树木均耐贫瘠，但杨树喜肥、喜水不耐水，柳树耐涝、榆树耐旱不耐水湿，对杨树、柳树和榆树而言，土壤养分缺失到何种程度会影响造林成活率和成效的研究很少。造林前后土壤养分的变化、不同养分状态下造林成活率的研究亦不甚明了。在干旱、寒冷、贫瘠和植被稀少的造林地上，常形成大面积的“小老树”[2，27]，在西藏人工造林地上面临着相同的境遇，部分造林地初期树木长势较好，而2～3年后却不断退化，作业区补植系数大。从本研究结果来看，西藏造林作业区土壤养分含量普遍偏低，土壤中N、P、K和有机质等养分普遍缺乏，可能是西藏人工造林质量不高、成林率低、成效低的主要原因之一。针叶树种是西藏有林县主要造林树种，主要分布林芝市和昌都市，适宜中性或微酸性土壤，作业区土壤养分较其他地区好，但有机质和磷钾养分也普遍缺乏，养分状况是否影响造林成效还有待研究。

3.3 西藏造林区土壤养分改善措施

西藏人工造林作业区土壤养分缺乏，可采取施肥的措施促进造林地树木生长[19，27]。施有机肥较施化肥效果更好[2，27]，特别是在土壤缺乏有机质的情况下可增施有机肥，阿里地区、日喀则市、拉萨市和山南市有机质“极缺”作业区居多（表6），且有机质与其他养分元素关系密切（表3），可尝试在该4个地市采取施有机肥的措施，以促进土壤养分的全面提升。施化肥是较为经济高效的措施，但施肥不当易造成土壤板结和环境污染。已知土壤养分状况并合理配置肥料组成将更有利于促进生长，单一的肥料养分组成并不能带来显著效果甚至无效，相反适合的N、P、K配比能促进树木更好地生长[2]。在有机肥供应有限的区域，还可通过林下种植绿肥压青改善土壤肥力[27，29-30]。西藏造林树种中杨树约6种、柳树7种、榆树1种、针叶树种10种、灌木树种4种，不同的树种具有不同的生理需求和生长习性，且不同地市间土壤养分差异性显著，西藏可根据所调查造林地土壤养分现状科学合理选择树种，并适当补充土壤养分以提高造林质量。

4 结 论

西藏造林地作业区土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质平均含量分别为1.39 g kg^{-1}、0.72 g kg^{-1}、6.26 g kg^{-1}、214.1 mg kg^{-1}、8.7 mg kg^{-1}、83.6 mg kg^{-1}和17.81 g kg^{-1}；全钾、有效磷、有机质和速效钾均处在“稍缺—极缺”水平，全氮和全磷均处在“中等—稍缺”水平，碱解氮状况最好，全钾含量状况最差。6地市除碱解氮外，土壤中分别存在2至5个养分元素的缺乏，多数作业区全钾、速效钾和有效磷不足。各地市间土壤养分含量差异显著，其中，pH在地市间差异最为明显，全钾差异性最弱。造林应据各地市造林作业区的养分差异选择适宜树种和施肥策略。阿里地区、日喀则市、拉萨市和山南市土壤更为贫

瘠，应选择耐贫瘠树种为主。日喀则市—林芝市、日喀则市—昌都市间氮、磷、钾元素均具有显著差异，而日喀则市、拉萨市和山南市速效钾和有机质均无差异，因而各地市的施肥策略也应不尽相同。

参 考 文 献

[1] 徐剑波，宋立生，彭磊，等. 土壤养分空间估测方法研究综述. 生态环境学报，2011，20（8/9）：1379—1386
Xu J B，Song L S，Peng L，et al. Research review on methods of spatial prediction of soil nutrients（In Chinese）. Ecology and Environmental Sciences，2011，20（8/9）：1379—1386

[2] 侯庆春，黄旭，韩仕峰，等. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究—Ⅱ土壤水分和养分状况及其与小老树生长的关系. 水土保持学报，1991，5（2）：75—83
Hou Q C，Huang X，Han S F，et al. The status of soil moistures and nutrients in small-old-tree stands and impact on tree growth（In Chinese）. Journal of Soil and Water Conservation，1991，5（2）：75—83

[3] 薛立，邝立刚，陈红跃，等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. 土壤学报，2003，40（2）：280—285
Xue L，Kuang L G，Chen H Y，et al. Soil nutrients，microorganisms and enzyme activities of different stands（In Chinese）.Acta Pedologica Sinica，2003，40（2）：280—285

[4] Pacala S，Socolow R. Stabilization wedges：Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. Science，2004，305（5686）：968—972

[5] Mallon K，Bourne G，Mott R. Climate solutions：WWF's vision for 2050. Gland:WWF International，2007：8—9

[6] 中国国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化国家方案. 2007，17
National Development and Reform Commission of China. The China National plan for climate change in China（In Chinese）. 2007，17

[7] Canadell J G，Raupach M R. Managing forests for climate change mitigation. Science，2008，320（5882）：1456—1457

[8] 黄麟，邵全琴，刘纪远. 江西省人工造林碳蓄积的时空过程. 生态学报，2015，35（7）：2105—2118
Huang L，Shao Q Q，Liu J Y. The spatial and temporal patterns of carbon sequestration by forestation in Jiangxi Province（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2015，35（7）：2105—2118

[9] 刘明国，韩洪云，刘孝义. 半干旱地区河滩宜林地立地条件研究. 应用生态学报，1998，9（4）：371—375
Liu M G，Han H Y，Liu X Y. Soil conditions of forest fitting land along river banks in semiarid region（In Chinese）. Chinese Journal of Applied Ecology，1998，9（4）：371—375

[10] 何方，何柏. 油茶栽培分布与立地分类的研究. 林业科学，2002，38（5）：64—72
He F，He B. Cultural distribution and site classification for *Camellia oleifera*（In Chinese）. Scientia Silvae Sinicae，2002，38（5）：64—72

[11] 潘学军，张文娥，罗国华，等. 不同土壤管理方式下幼龄柑橘根区土壤酶活性动态变化. 土壤通报，2011，42（5）：1116—1119
Pan X J，Zhang W E，Luo G H，et al. Dynamic change of soil enzyme activities under different soil managements in *Citrus* root zone（In Chinese）. Chinese Journal of Soil Science，2011，42（5）：1116—1119

[12] 姬生勋，刘玉涛，董智，等. 黄泛平原风沙区不同造林年限林地土壤风蚀与理化性质的变化. 水土保持研究，2011，18（3）：158—161，167
Ji S X，Liu Y T，Dong Z，et al. Variations of wind erosion and soil physicochemical properties in artificial afforestation with different years in Yellow River Flood Plain（In Chinese）. Research of Soil and Water Conservation，2011，18（3）：158—161，167

[13] Zhao F，Kang D，Han X，et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. Ecological Engineering，2015，74：415—422

[14] Principe R E，Márquez J A，Martina L C，et al. Pine afforestation changes more strongly community structure than ecosystem functioning in grassland mountain streams. Ecological Indicators，2015，57：366—375

[15] 全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范. 北京:中国农业出版社，2006
National Agro-tech Extensions and Service Center. Technical specifications forsoil analysis（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，2006

[16] 邓欧平，周稀，黄萍萍，等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究. 资源科学，2013，35（12）：2434—2443
Deng O P，Zhou X，Huang P P，et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan（In Chinese）. Resources Science，2013，35（12）：2434—2443

[17] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京:中国农业出版

社，1998

National Soil SurveyOffice. Chinese Soils (In Chinese) . Beijing: China Agriculture Press，1998

[18] 王义，刘美英，陈士超，等. 神东矿区土壤肥力与盐分特征研究. 干旱区资源与环境，2014，28（9）：63—68

Wang Y，Liu M Y，Chen S C，et al. Preliminary study on soil fertility characteristics in Shen-Dong mining area （In Chinese）. Journal of Arid Land Resources and Environment，2014，28（9）：63—68

[19] 夏增禄，李森照，李廷芳，等. 土壤元素背景值及其研究方法. 北京：气象出版社，1987：212—213

Xia Z L，Li S Z，Li T F，et al. Background value of soil element and its research methods (In Chinese) . Beijing：China Meteorological Press，1987：212—213

[20] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏土壤. 北京：科学出版社，1985：277—303

The Tibetan Plateau Comprehensive Scientific Expedition of the Chinese Academy of Sciences. Tibet soil (In Chinese) . Beijing：Science Press，1985：277—303

[21] 普布次仁，米玛次仁，土登江层，等. 拉萨市周边土壤养分分析. 农业与技术，2015，35（7）：18—20，44

Pu B C ，Mi M C ，Tu D J ，et al. Soil nutrient analysis around Lhasa (In Chinese) . Agriculture and Technology，2015，35（7）：18—20，44

[22] 西藏自治区日喀则地区农牧局. 西藏日喀则地区土地资源. 北京：中国农业科技出版社，1993

Shigatse Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Tibet. Land resources in Shigatse district of Tibet (In Chinese) . Beijing：China Agricultural Science and Technology Press，1993

[23] 达娃扎西，贺东北，普布顿珠，等. 西藏自治区山南市猴子山宜林地土壤质量评价与利用对策. 中南林业调查规划，2013，32（1）：56—58

Da W Z，He D B，Pu B D，et al. Soil quality evaluation and utilization of suitable forest land in the Monkey Mountain，Shannan Prefecture of Tibet （In Chinese）. Central South Forest Inventory and Planning，2013，32（1）：56—58

[24] 西藏自治区林芝地区农牧局. 西藏林芝地区土地资源. 北京：中国农业科技出版社，1992

Nyingchi Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Tibet. Land resources in Nyingchi district of Tibet (In Chinese) . Beijing：China Agricultural Science and Technology Press，1992

[25] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候. 北京：科学出版社，1984

The Tibetan Plateau Comprehensive Scientific Expedition of the Chinese Academy of Sciences. Tibet climate (In Chinese) . Beijing：Science Press，1984

[26] 姜岩. 土壤. 长春:吉林人民出版社，1983

Jiang Y. Soil (In Chinese) . Changchun：Jilin People's Press，1983

[27] 于铁树，刘高仁，郑方勤，等. 晋西北杨树旱作丰产技术初步研究. 山西林业科技，1988（4）：13—20

Yu T S，Liu G R，Zheng F Q，et al. A preliminary study on *Populus* for drought resistance and high yield in northwest Shanxi Province (In Chinese) . Shanxi Forestry Science and Technology，1988（4）：13—20

[28] 李贻铨. 杨树施肥的理论与实践. 林业资源管理，1983（6）：1—7

Li Y Q. The fertilizing theory and practice of poplar （In Chinese）. Forest Resources Management，1983（6）：1—7

[29] 屠梦照，姚文华. 幼林地间种绿肥—山毛豆的试验效应简报. 土壤通报，1983，15（6）：31—32

Tu M Z，Yao W H. An experimental effect brief-report on interplanting green manure—white tephrosia in young forest land (In Chinese) . Chinese Journal of Soil Science，1983，15（6）：31—32

[30] 陈永川，杨春霞，赵志平，等. 不同管理方式下橡胶林土壤氮动态特征. 生态学杂志，2012，31（4）：954—960

Chen Y C，Yang C X，Zhao Z P，et al. Variations of soil nitrogen in rubber plantations under different managements (In Chinese) . Chinese Journal of Ecology，2012，31（4）：954—960

Characterization of Soil Nutrient Status of Areas to be Afforested in Tibet, China

LUO Hong[1, 2]　WU Jianpu[2]　BIANBA Duoji[2]　GAMA Qunzong[2]　ZHU Xuelin[2†]

(1 *Institute of Forest Resource Information Techniques*, *Chinese Academy of Forestry*, *Beijing* 100091, *China*)

(2 *Forest Inventory and Planning Institute of Tibet*, *Lhasa* 850000, *China*)

Abstract 【Objective】This research aims to understand soil nutrient status of areas to be afforested in Tibet, China, so as to design optimal afforestation technologies. 【Method】Soil samples were collected from 524 areas to be afforested in 6 regions of Tibet for analysis of eight soil nutrient elements. 【Result】Results show that: (1) the soil samples were 6.26 g kg^{-1}, 8.7 mg kg^{-1}, 17.81 g kg^{-1} and 83.6 mg kg^{-1} in total potassium, available phosphorus, organic matter and available potassium, respectively, all falling into the level of "Slightly ~ Extremely Deficient", and 1.39 g kg^{-1} and 0.72 g kg^{-1} in total nitrogen, and total phosphorus, both being sorted into the level of "Moderate ~ Slightly Deficient", with alkaline nitrogen ranking on the top and being 214.1 mg kg^{-1} on average, and total potassium ranking in the bottom; (2) the soils in the six regions suffered deficiency in 2 ~ 5 of the nutrient elements, except for alkaline nitrogen; the soils in most of the afforesting areas were deficient in total potassium, readily available potassium, and available phosphorus; the soils in Ngari were extremely deficient in organic matter, being only 5.08 g kg^{-1}; the soils in Shigatse, Lhasa, Nyingchi were extremely deficient in total potassium, being only 5.19 ~ 6.42 g kg^{-1}; and the soils in Shannan and Qamdo were extremely deficient in available phosphorus, being only 3.9 ~ 5.4 mg kg^{-1}. Besides, the soils in Lhasa, Shannan and Ngari were insufficient in total nitrogen; the soils in Lhasa, Shannan and Ngari were insufficient in total phosphorus; and in all the regions, except for Qamdo, the soils in most afforesting areas were insufficient in organic matter; and (3) the soils varied sharply in soil nutrient content from region to region, but the soils in Shigatse, Lhasa and Shannan did not differ much in readily available potassium and organic matter. 【Conclusion】The findings of this study demonstrate that the soils in most of the afforesting areas in Tibet are quite poor in soil nutrient status. Through characterizing the soil nutrient status in the afforesting areas in Tibet, the study may provide a scientific basis for investigation of factors affecting growth of the trees planted, and fundamental data, as well, for further improving quality of the afforestation.

Key words Soil nutrient; Afforestation; Afforestation areas; Artificial forest; Tibet; Prefectures

（责任编辑：陈荣府）