

# 北京八达岭林场水源涵养林林分结构与土壤的相关性研究

孟 楚,郑小贤\*,王 威

(北京林业大学 森林资源与环境管理国家林业局重点实验室,北京 100083)

**摘 要:**分析北京八达岭林场水源涵养林主要森林类型人工针叶林、天然阔叶林、人工针阔混交林和天然灌木林的土壤理化性质以及林分结构与土壤的相关关系。结果表明:研究区 4 种主要森林类型的土壤理化性质差异显著;天然林的土壤理化性质优于人工林,针阔混交林优于针叶纯林,天然灌木林的林分稳定性最强;与土壤化学性质相比,土壤物理性质与林分结构的相关性较大。研究结果为研究区水源涵养林经营提供了依据。

**关键词:**八达岭林场;水源涵养林;土壤;林分结构

**中图分类号:**S758.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)04-0099-07

## Correlation between Stand Structure and Soil of Water Conservation Forest in Badaling Forest Farm of Beijing

MENG Chu,ZHENG Xiao-xian\*,WANG Wei

(State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management,  
Beijing Forestry University,Beijing 100083,China)

**Abstract:**The soil structure and the correlation between stand structure and soils of the main forest types (artificial coniferous,natural broad-leaved forest,artificial mixed wood and natural bush) of water conservation forest in Badaling Forest Farm of Beijing were analyzed. The results showed that the differences in soil physical and chemical properties between four types were significant. The soil structure of natural forest was better than that of artificial forest; the soil structure of the mixed forest was better than that of pure forest; stand stability of natural bush was the best. Compared with the soil chemical structure,the soil physical structure had closer relationship with stand structure. The results would provide the basis for the management of water conservation forest in the study area.

**Key words:**Badaling Forest Farm; water conservation forest; soil; stand structure

水源涵养林是以蓄水、调节水量、延长径流时间、改善水质等功能为主的森林和林木,泛指河川、水库、湖泊的上游集水区内大面积的天然林和人工林以及其他植被资源<sup>[1-5]</sup>。北京是水资源严重不足和土地荒漠化十分严重的地区,对北京地区水源涵养林林分状况进行研究,对于提高其生态功能具有重要意义<sup>[6-9]</sup>。宁金魁<sup>[10]</sup>尝试用干扰指数定量描述北京密云水库周边地区水源涵养林林分结构,并提出调整建议和目标结构。王威<sup>[11]</sup>等通过对北京山

区水源涵养林的林分水平结构、垂直结构和土壤结构等进行研究,提出水源涵养林典型森林类型的结构特征。赵阳<sup>[12]</sup>等利用混交度、角尺度和大小比数分析了北京西山侧柏水源涵养林空间结构特征。罗梅<sup>[13]</sup>等建立结构与功能耦合模型,评价北京密云水库水源涵养林 8 种森林类型的生态功能。这些已有研究多是对水源涵养林林分结构以及功能的研究,鲜有学者对水源涵养林林分结构与环境因子的相关关系进行研究。阐明林分结构与环境因子的关系,

收稿日期:2015-09-07 修回日期:2015-11-02

基金项目:北京市教育委员会科学研究与研究生培养共建项目资助。

作者简介:孟 楚,女,硕士研究生,研究方向:森林可持续经营理论与技术。E-mail:MengChu2345@163.com

\* 通信作者:郑小贤,男,教授,博士生导师,研究方向:森林可持续经营理论与技术。E-mail:zheng8355@bjfu.edu.cn

有助于改善水源涵养林林分结构,更大地发挥其生态功能。

本研究以北京八达岭林场水源涵养林为研究对象,应用除趋势典范对应分析(DCCA)定量分析水源涵养林主要森林类型林分结构与土壤因子间的关系,旨在为八达岭林场水源涵养林经营提供依据。

1 研究区概况

北京市八达岭林场(115°55'E,40°17'N)位于延庆县东南部,地处万里长城居庸关和八达岭之间,总面积 2 940 hm<sup>2</sup>。林场基本处于山区,平均海拔为 780 m,最高海拔达到 1 238 m,最低海拔为 450 m,相对高差为 788 m。属大陆性季风气候,具备半干旱、半湿润的暖温带气候特点。年平均气温为 10.8℃,最高月份(7 月份)平均气温为 26.9℃,最低月份(1 月份)平均气温为-7.2℃。年平均降雨量 454 mm,集中在 7、8 月份,占年降雨量的 59%左右。研究区属山地褐土区,主要有 3 种土壤类型:典型褐土、淋溶褐土以及碳酸盐褐土<sup>[14-16]</sup>。

林场主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、山杨(*Populus davidiana*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等。水源

涵养林主要森林类型有人工针叶林、天然阔叶林、人工针阔混交林和天然灌木林等。

2 数据来源与研究方法

2.1 样地设置与调查

在对研究区进行踏查的基础上,选择具有代表性的地段设置 25 块针叶林样地(30 m×30 m)、25 块阔叶林样地(30 m×30 m)和 23 块针阔混交林样地(30 m×30 m);灌木林样地从海拔 600 m 开始设置,每上升 100 m 布设约 10 块样地(10 m×10 m),一直到山顶,共计 40 块。样地基本情况见表 1。

乔木林调查:以 10 m 为间距将样地分割为面积为 100 m<sup>2</sup> 的正方形调查单元进行每木调查和定位调查;在样地的 4 个角和中心分别设置灌木样方(5 m×5 m)和草本样方(1 m×1 m),分别调查并记录灌木层和草本层物种的名称、频度、盖度;挖土壤剖面,调查并取样;记录样地的海拔、坡度、坡向等地形因子。

灌木林调查:将每块样地划分成 4 个样方(5 m×5 m)进行灌木调查,并在样地的四个角和中心设置 5 个样方(2 m×2 m)进行草本调查;挖土壤剖面,调查并取样,并记录样地的海拔、坡度、坡向等地形因子。

表 1 标准地基本概况  
Table 1 Basis information of sampling plots

森林类型	平均坡度 /(°)	坡向 (阴坡;阳坡)	平均海拔 /m	主要树种	样地数量 /块	样地面积 /m <sup>2</sup>
人工针叶林	21	6 : 4	723	油松等	25	30×30
天然阔叶林	23	4 : 6	805	刺槐、椴树等	25	30×30
人工针阔混交林	22	3 : 7	700	油松、山杏等	23	30×30
天然灌木林	29	5 : 5	821	荆条、小叶鼠李等	40	10×10

2.2 研究方法

本研究采用去趋势典范对应分析(DCCA)研究八达岭林场主要森林类型林分结构与土壤理化性质的相关性。以科学性、可操作性为原则,选取的林分结构因子有乔木层丰富度、灌木层丰富度、草本层丰富度、乔木层郁闭度、灌木层盖度和草本层盖度;选取土壤厚度(SOID)、非毛管孔隙度(UCAPD)、毛管孔隙度(CAPD)、总孔隙度(TOPD)、容重(SOBD)等物理性质和 pH、全氮(TN)、有效氮(AN)、全磷(TP)、有效磷(AP)、全钾(TK)、有效钾(AK)、有机质(ORGS)等化学性质。

丰富度的计算公式如下:

$$D = S \tag{1}$$

式中,D 代表物种丰富度;S 代表物种的数目。

3 结果与分析

3.1 土壤的理化性质

八达岭林场主要森林类型的土壤物理性质如表 2。由不同森林类型土壤物理性质方差分析(见表 3)可知,研究区主要森林类型的土壤物理性质的差异显著( $p<0.05$ )。

由表 2 可知,SOID 和 SOBD 指标显示,天然阔叶林>人工针阔混交林>人工针叶林>天然灌木林,天然阔叶林的 SOID 最大,表明其具有较好的水源涵养功能;天然灌木林的 SOBD 最小,表明其土壤熟化程度较高。CAPD 和 TOPD 指标显示,天然灌木林>人工针阔混交林>天然阔叶林>人工针叶林,而 UCAPD 指标趋势为天然阔叶林>天然灌木林>人工针阔混交林>人工针叶林,研究区天然阔

叶林和天然灌木林的非毛管孔隙度较大,调节地表径流和涵养水源的能力较强。

八达岭林场主要森林类型的土壤化学性质见表 4。由不同森林类型土壤化学性质方差分析(见表 5)可知,研究区主要森林类型的土壤化学性质差异显著( $p<0.05$ )。

由表 4 可知,土壤中 TK、TP、TN、ORGS 等的

含量为天然灌木林>天然阔叶林>人工针阔混交林>人工针叶林的趋势,天然灌木林和天然阔叶林的土壤养分含量>人工针阔混交林和人工针叶林,而人工针阔混交林的土壤养分含量>人工针叶林,研究区这一特征与实际规律相符合。此外,灌木林具有良好的改良土壤理化性质的特点。天然灌木林和天然阔叶林在研究区水源涵养林中具有重要作用。

表 2 八达岭林场水源涵养林主要森林土壤物理性质

森林类型	SOID		UCAPD		CAPD		TOPD		SOBD	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
人工针叶林	0.71	0.27	0.12	0.03	0.25	0.04	0.37	0.06	1.03	0.09
天然阔叶林	0.84	0.28	0.19	0.04	0.31	0.04	0.50	0.06	1.22	0.09
人工针阔混交林	0.81	0.21	0.16	0.03	0.35	0.04	0.51	0.06	1.10	0.07
天然灌木林	0.49	0.15	0.17	0.12	0.36	0.16	0.52	0.19	0.95	0.21

注: $\bar{x}$ 代表均值, $\sigma$ 代表标准差,SOID 单位为 cm,SOBD 单位为  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,下同。

表 3 研究区土壤物理性质的方差分析

Table 3 Analysis of variance of soil physical properties in study area

		平方和	$df$	均方	$F$	$p$
SOID	组间	2.547	3	0.849	16.098	0.000
	组内	5.747	109	0.053		
	总数	8.294	112			
UCAPD	组间	0.074	3	0.025	19.228	0.000
	组内	0.140	109	0.001		
	总数	0.214	112			
CAPD	组间	0.212	3	0.071	41.161	0.000
	组内	0.188	109	0.002		
	总数	0.400	112			
SOBD	组间	1.155	3	0.385	56.392	0.000
	组内	0.744	109	0.007		
	总数	1.899	112			
TOPD	组间	0.466	3	0.155	48.624	0.000
	组内	0.348	109	0.003		
	总数	0.814	112			

表 4 八达岭林场水源涵养林主要森林类型土壤化学性质

Table 4 Soil chemical properties of main forest types of water conservation forest in Badaling Forest Farm

森林类型	TN		AN		TP		AP		TK		AK		ORGS		pH	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
人工针叶林	0.88	0.18	21.83	2.83	0.51	0.17	9.53	2.74	2.46	0.87	107.00	15.59	22.98	3.83	7.02	0.29
天然阔叶林	1.14	0.25	23.19	3.19	0.62	0.18	13.28	2.95	3.17	1.14	128.12	13.80	30.44	5.30	6.77	0.36
人工针阔混交林	1.01	0.18	25.95	3.68	0.58	0.19	12.02	3.52	2.99	0.79	119.09	17.18	28.33	5.26	6.91	0.28
天然灌木林	1.19	0.20	24.63	4.07	0.69	0.18	10.79	2.94	3.19	1.02	117.63	12.74	30.79	3.66	6.77	0.27

注:ORGS 的单位为  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,TN、AN、TP、AP、TK、AK 的单位为  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;下同。

3.2 林分结构与土壤因子的相关性研究

3.2.1 人工针叶林 人工针叶林的林分结构与土壤的 DCCA 相关性分析结果见表 6 和图 1。由表 6 和图 1 可以得到,AX1 轴代表土壤的物理性质,其方差贡献率达到 60.1%,表明土壤的物理性质与针叶林林分结构的相关性较大。土壤的物理性质中,

UCAPD 的特征向量为-0.51,是最主要的影响因子,而 CAPD(0.35)、SOID(0.42)、TOPD(0.40)和 SOBD(0.39)的特征向量大致相等,它们对土壤物理性质的影响程度相差不大。而代表土壤化学性质的 AX2 轴的方差贡献率为 39.9%,其中 ORGS(-0.37)和 AP(-0.33)等因子的特征向量相对较

大。北京气候干燥,土壤是植物吸收水分的主要场所,土壤物理性质中非毛管孔隙度、土壤厚度等因子是影响土壤含水量的主要因子,研究结果与研究区实际情况相符。

表 5 研究区土壤化学性质的方差分析

Table 5 Analysis of the variance of soil chemical properties in study area

		平方和	df	均方	F	p
TN	组间	1.654	3	0.551	12.706	0.000
	组内	4.730	109	0.043		
	总数	6.384	112			
AN	组间	237.138	3	79.046	6.028	0.001
	组内	1 429.391	109	13.114		
	总数	1 666.529	112			
TP	组间	0.483	3	0.161	4.851	0.003
	组内	3.615	109	0.033		
	总数	4.098	112			
AP	组间	198.287	3	66.096	6.952	0.000
	组内	1 036.293	109	9.507		
	总数	1 234.579	112			
TK	组间	9.484	3	3.161	3.195	0.026
	组内	107.850	109	0.989		
	总数	117.333	112			
AK	组间	5 618.669	3	1 872.890	8.465	0.000
	组内	24 116.412	109	221.251		
	总数	29 735.081	112			
ORGS	组间	1 067.206	3	355.735	17.297	0.000
	组内	2 241.679	109	20.566		
	总数	3 308.885	112			
pH	组间	1.252	3	0.417	4.570	0.005
	组内	9.952	109	0.091		
	总数	11.204	112			

表 6 人工针叶林的林分结构与土壤性质的相关性

Table 6 The correlation between stand structure and soil properties of artificial coniferous

轴	$\lambda$	$\Sigma X/\%$	UCAPD	CAPD	SOID	TOPD	SOBD	TN	AN	TP	AP	TK	AK	ORGS	pH
AX1	0.92	60.10	-0.51	0.35	0.42	0.40	0.39	-0.48	-0.20	-0.40	-0.09	-0.28	-0.30	0.25	-0.04
AX2	0.60	100.00	0.12	-0.37	0.64	-0.39	0.24	0.28	0.08	0.05	-0.33	-0.11	-0.10	-0.37	-0.05

注: $\lambda$ 代表特征根, $\Sigma X$ 表示累积方差贡献率。下同。

为了防止地形因素(海拔、坡度和坡向)的影响,对林分结构与环境因子间的关系进行定量研究,结果见表 7。由表 7 可知,人工针叶林林分结构的总体特征向量为 1.22,土壤、地形因素解释了 81%的林分结构,剩余的 19%的林分结构未能解释,可能与其他环境因子有关。环境因素对林分结构的解释程度是与林分本身的复杂程度呈现负相关的。此外,由土壤因素引起的变异占总体变异的 61%,而地形引起的变异占 17%,二者交互作用引起的变异占 3%,表明各环境因子中,土壤因素与研究区人工针叶林林分结构的相关性更大。

3.3.2 天然阔叶林 天然阔叶林的林分结构与土壤理化因子的 DCCA 相关性分析结果见表 8 和图 2,由此可以得到,AX1 轴代表土壤的物理性质,其方差贡献率达到 61.6%,表明土壤的物理性质与天

然阔叶林的林分结构的相关性较大。土壤的物理性质中,UCAPD(-0.69)、SOID(0.59)等是主要的影  
响因子,而土壤化学性质中,TN(-0.42)、TP(0.34)等因子的特征向量相对较大。

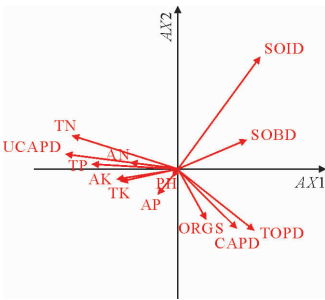


图 1 人工针叶林的林分结构与土壤理化性质的相关性  
Fig. 1 The correlation between stand structure and soil properties of artificial coniferous

由表 9 可知,天然阔叶林林分结构的总体特征向量为 1.42,土壤、地形因素解释了 68%的林分结构,32%的林分结构未能解释,与其他环境因子有关。此外,由土壤因素引起的变异占总体变异的 46%,而地形引起的变异占 14%,二者交互作用引起的变异占 8%,表明各环境因子中,土壤因素与研究区天然阔叶林林分结构的相关性更大。

3.3.3 人工针阔混交林 人工针阔混交林的林分结构与土壤理化因子的相关性分析结果见表 10 和图 3,由此可以得到,AX1 轴代表土壤的物理性质,其方差贡献率达到 78.2%,表明土壤的物理性质与人工针阔混交林的林分结构的相关性较大。土壤的物理性质中,SOID(0.72)的特征向量最大,UCAPD(−0.43)、CAPD(0.39)、TOPD(0.40)和 SOBD(0.36)的特征向量差异较小。而土壤的化学性质

表 8 天然阔叶林林分结构与土壤性质的相关性

Table 8 The correlation between stand structure and soil properties of natural broad-leaved forest

轴	$\lambda$	$\Sigma X/\%$	UCAPD	CAPD	SOID	TOPD	SOBD	TN	AN	TP	AP	TK	AK	ORGS	pH
AX1	0.80	61.6	−0.69	0.21	0.59	0.26	0.42	0.20	−0.20	−0.18	−0.31	0.27	−0.37	0.25	−0.05
AX2	0.73	100.0	0.16	−0.02	−0.15	0.33	−0.28	−0.42	0.17	0.34	−0.11	0.03	0.15	−0.14	−0.27

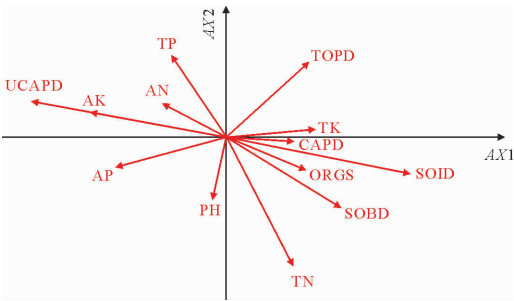


图 2 天然阔叶林林分结构与土壤理化性质的相关性

Fig. 2 The correlation between stand structure and soil properties of natural broad-leaved forest

表 9 天然阔叶林林分结构与环境因子相关性的定量化解释  
Table 9 The quantitative explanation of relationship between stand structure of artificial mixed wood and environmental factors

	特征向量	解释率/%
A <sub>总体</sub>	1.42	—
A <sub>土壤</sub>	0.65	46.0
A <sub>地形</sub>	0.20	14.0
A <sub>交互</sub>	0.12	8.0
A <sub>环境</sub>	0.97	68.0
A <sub>未</sub>	0.45	32.0

由表 11 可知,人工针阔混交林林分结构的总体特征向量为 1.56,土壤、地形因素解释了 79%的林分结构,21%的林分结构未能解释,与其他环境因子有关。此外,由土壤因素引起的变异占总体变异的 39%,而地形引起的变异占 30%,二者交互作用引起的变异占 10%,表明各环境因子中,土壤因素与

中,TP(−0.34)、TK(−0.28)等因子是影响林分结构的主要因子。

表 7 人工针叶林林分结构与环境因子相关性的定量化解释  
Table 7 The quantitative explanation of relationship between stand structure of artificial coniferous and environmental factors

	特征向量	解释率/%
A <sub>总体</sub>	1.22	—
A <sub>土壤</sub>	0.74	61.0
A <sub>地形</sub>	0.21	17.0
A <sub>交互</sub>	0.04	3.0
A <sub>环境</sub>	0.99	81.0
A <sub>未</sub>	0.23	19.0

注:A<sub>总体</sub>代表林分结构总体变异;A<sub>土壤</sub>代表林分结构与土壤因素;A<sub>地形</sub>代表林分结构与地形因素;A<sub>交互</sub>代表土壤、地形因素对林分结构交互作用;A<sub>环境</sub>代表林分结构与土壤、地形因素;A<sub>未</sub>代表土壤、地形因素未能解释的部分。下同。

研究区人工针阔混交林林分结构的相关性更大。

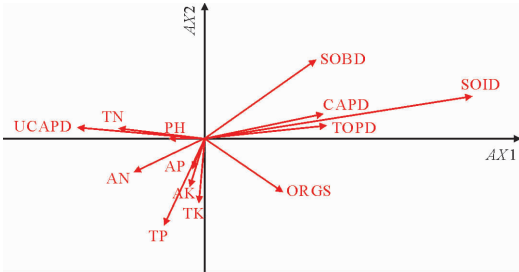


图 3 人工针阔混交林林分结构与土壤理化性质的相关性

Fig. 3 The correlation between stand structure and soil properties of artificial mixed wood

3.3.4 天然灌木林 天然灌木林的林分结构与土壤因素的相关性分析结果见表 12 和图 4,由此可以得到,AX1 轴代表土壤的物理性质,其方差贡献率达到 77.1%,表明土壤的物理性质与研究区天然灌木林的林分结构的相关性较大。土壤的物理性质中,SOBD(0.76)的特征向量最大;而土壤的化学性质中,TK(−0.34)是影响林分结构的主要因子。

由表 13 可知,天然灌木林林分结构的总体特征向量为 1.42,土壤、地形因素解释了 79%的林分结构,21%的林分结构未能解释,与其他环境因子有关。此外,由土壤因素引起的变异占总体变异的 39%,而地形引起的变异占 30%,二者交互作用引起的变异占 10%,表明各环境因子中,土壤因素与研究区人工针阔混交林林分结构的相关性更大。

表 10 人工针阔混交林林分结构与土壤性质的相关性

Table 10 The correlation between stand structure and soil properties of artificial mixed wood																
轴	$\lambda$	$\Sigma X/\%$	UCAPD	CAPD	SOID	TOPD	SOBD	TN	AN	TP	AP	TK	AK	ORGS	pH	
AX1	0.91	78.2	-0.43	0.39	0.72	0.40	0.36	-0.28	-0.26	-0.16	-0.08	-0.05	-0.09	-0.23	-0.13	
AX2	0.68	100.0	0.07	0.10	0.21	0.06	0.38	0.07	-0.18	-0.34	-0.10	-0.28	-0.20	-0.24	-0.01	

表 11 人工针阔混交林林分结构与环境因子相关性的定量化解释

Table 11 The quantitative explanation of relationship between stand structure of artificial mixed wood and environmental factors		
	特征向量	解释率/%
A <sub>总体</sub>	1.56	—
A <sub>土壤</sub>	0.61	39.0
A <sub>地形</sub>	0.46	30.0
A <sub>交互</sub>	0.15	10.0
A <sub>环境</sub>	1.23	79.0
A <sub>未</sub>	0.34	21.0

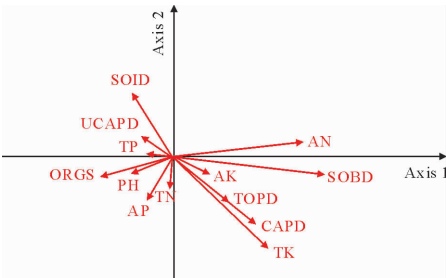


图 4 天然灌木林林分结构与土壤理化性质的相关性  
Fig. 4 The correlation between stand structure and soil properties of natural bush

表 12 天然灌木林林分结构与土壤性质的相关性

Table12 The correlation between stand structure and soil properties of natural bush																
轴	$\lambda$	$\Sigma X/\%$	UCAPD	CAPD	SOID	TOPD	SOBD	TN	AN	TP	AP	TK	AK	ORGS	pH	
AX1	0.90	77.1	-0.12	0.31	-0.15	0.21	0.76	-0.01	0.58	-0.10	-0.09	0.35	0.15	-0.26	-0.15	
AX2	0.72	100.0	0.08	-0.25	0.24	-0.17	-0.06	0.01	0.06	0.01	-0.16	-0.34	-0.07	-0.07	-0.06	

表 13 天然灌木林林分结构与环境因子相关性的定量化解释

Table 13 The quantitative explanation of relationship between stand structure of natural bush and environmental factors		
	特征向量	解释率/%
A <sub>总体</sub>	6.40	—
A <sub>土壤</sub>	2.52	39.0
A <sub>地形</sub>	0.97	12.0
A <sub>交互</sub>	0.76	3.0
A <sub>环境</sub>	2.90	54.0
A <sub>未</sub>	2.78	46.0

4 结论与讨论

4.1 结论

北京市八达岭林场主要森林类型土壤理化性质差异显著。天然林的土壤理化性质优于人工林，针阔混交林优于针叶纯林。

对研究区 4 种主要森林类型的林分结构与土壤理化性质的相关性进行分析，不同的土壤理化因子对林分结构的影响不同，其中土壤厚度、孔隙度等土壤物理性质与林分结构的关系较大；此外，与土壤化学性质相比，土壤的物理性质对研究区水源涵养林的林分结构有较大的影响。

土壤对林分结构解释能力为：人工针叶林(61.0%)>天然阔叶林(46%)>人工针阔混交林(39.0%)=天然灌木林(39.0%)；环境因子对林分结构解释能力为：人工针叶林(81.0%)>人工针阔混交林(79.0%)>天然阔叶林(68.0%)>天然灌木

林(54%)；环境因子对天然灌木林结构的解释能力最弱，表明天然灌木林的林分稳定性最强。

4.2 讨论

本研究定量描述土壤这一环境因子与八达岭林场人工针叶林、天然阔叶林、人工针阔混交林和天然灌木林 4 种水源涵养林主要森林类型林分结构的相关关系，林分结构因子中仅考虑了乔、灌、草 3 层的物种丰富度和盖度等林分基本结构因子，在以后的研究中，可进一步考虑林分空间结构因子与土壤的关系。此外，除地形和土壤以外，其他环境因子对林分结构的影响也是今后要研究的重点之一。

参考文献：

[1] 秦永胜,余新晓,陈丽华,等.北京密云水库流域水源保护林区径流空间尺度效应的研究[J].生态学报,2001,21(6):913-918.  
QIN Y S,YU X X,CHEN L H,*et al.* Spatial scale effects of runoff on the water resource conservation forest watershed within the Miyun reservoir basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001,21(6):913-918. (Chinese)

[2] 道如娜,王树森,李建强,等.太子河流域水源涵养林恢复植被的植物生态位变化[J].东北林业大学学报,2014,42(1):31-41,70.  
DAO R N,WANG S S,LI J Q,*et al.* Plant niche changes of the rehabilitating water and soil conservation vegetations in Taizi watershed[J]. Journal of Northeast of Forestry University, 2014,42(1):31-41,70. (Chinese)

[3] 孙浩,杨民益,余杨春,等.宁夏六盘山几种典型水源涵养林林分结构与水文功能的关系[J].中国水土保持科学,2014,12

(1):10-18.

[4] 陈艳,贺康宁,伏凯,等. 青海大通不同树种水源涵养林对水质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):220-225.  
CHEN Y,HE K N,FU K,*et al.* Effects of water conservation forest of different tree species on water qualities in Datong, Qinghai[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(1):220-225. (Chinese)

[5] 汪加魏,于丹丹,尹群,等. 北京市八达岭林场景观型水源涵养林健康评价研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(1):233-239.  
WANG J W,YU D D,YING Q,*et al.* Forest health evaluation for landscape type of water conservation in Badaling forest farm in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(1):233-239. (Chinese)

[6] 刘世海,余新晓. 北京密云水库库区水源涵养林冠层水文特征研究[J]. 林业科学,2005,41(1):194-197.  
LIU S H,YU X X. Hydrological properties of the canopy of water resource protection stands in the Miyun reservoir watershed,Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae,2005,41(1):194-197. (Chinese)

[7] 刘畅. 北京市八达岭林场阔叶次生林林分结构与健康经营关键技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[8] 王威,郑小贤,杜丽侠. 北京山区水源林林分结构与功能耦合关系[J]. 东北林业大学学报,2011,39(7):22-24.

[9] 蒋桂娟,郑小贤,宁杨翠. 林分结构与水源涵养功能耦合关系研究—以北京八达岭林场为例[J]. 西北林学院学报,2012,27(2):175-179.

JIANG G J,ZHENG X X,NING Y C. Relationship between forest stand structure and function of water conservation—a case study of Badaling forest farm[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):175-179. (Chinese)

[10] 宁金魁. 水源涵养林结构调整研究—以北京密云水库周边水源涵养林为例[D]. 北京:北京林业大学,2004.

[11] 王威,郑小贤,宁杨翠. 北京山区水源涵养林典型森林类型结构特征研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(1):60-63.  
WANG W,ZHENG X X,NING Y C. Structural characteristics of typical water conservation forests in mountain areas of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University,2011,33(1):60-63. (Chinese)

[12] 赵阳,余新晓,黄枝英,等. 北京西山侧柏水源涵养林空间结构特征研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):183-188.

[13] 罗梅,郑小贤,王威,等. 水源涵养林结构与功能耦合关系模型研究[J]. 林业资源管理,2011(5):84-88.

[14] 秦红斌. GIS在八达岭林场风景林树种选择与配置中的应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[15] 王威. 北京山区水源涵养林结构与功能耦合关系研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.

[16] 罗梅,郑小贤. 八达岭辽东栎-油松混交林空间结构及其多样性[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(9):55-58.  
LUO M,ZHENG X X. Study of spatial structure and species diversity of *Quercus liaotungensis*-*Pinus tabulaeformis* mixed stand in Badaling forest farm[J]. Journal of Central South University of Forestry& Technology,2012,32(9):55-58. (Chinese)

(上接第 47 页)

[7] 罗霄,郑国琦,郑紫燕,等. 宁夏枸杞果实遮光处理对果实糖积累和相关酶活性的影响[J]. 西北植物学报,2008(5):984-989.

[8] HOUGHTON J T,DING Y H,GRIGGS D G,*et al.* Climate change 2001:the scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of international panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2001.

[9] 刘发民,王利荣,李怡,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对木本植物影响的研究进展[J]. 安徽农业科学,2008(28):12182-12185.

[10] 任锦,郭双生,程泉勇,等. 受控环境因素光和高 CO<sub>2</sub> 下植物抗氧化系统的研究进展[J]. 航天医学与医学工程,2011(6):451-459.

[11] 王建林,温学发,赵风华,等. CO<sub>2</sub> 浓度倍增对 8 种作物叶片光合作用、蒸腾作用 and 水分利用效率的影响[J]. 植物生态学报,2012(5):438-446.

[12] 杨连新,王云霞,朱建国,等. 开放式空气中 CO<sub>2</sub> 浓度增高(FACE)对水稻生长和发育的影响[J]. 生态学报,2010,30(6):1573-1585.

[13] 徐胜,陈玮,何兴元,等. 高浓度 CO<sub>2</sub> 对树木生理生态的影响研究进展[J]. 生态学报,2015,35(8):2452-2460.  
XU S,CHEN W,HE X Y,*et al.* Impact of elevated CO<sub>2</sub> on eco-physiology of tress[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(8):2452-2460. (in Chinese)

[14] 牛耀芳. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对拟南芥根毛发育与养分吸收的影响及根系对养分的响应机理[D]. 杭州:浙江大学,2013.

[15] 赵天宏,王美玉,张巍巍,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境,2006(5):1096-1100.

[16] 王为民,王晨,李春俭,等. 大气二氧化碳浓度升高对植物生长的影响[J]. 西北植物学报,2000,20(4):676-683.

[17] 刘俊稚. 几种典型植物对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的生理和病理响应研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[18] 赵智中,张上隆,徐昌杰,等. 蔗糖代谢相关酶在温州蜜柑果实糖积累中的作用[J]. 园艺学报,2001(2):112-118.

[19] 郑国琦,罗霄,郑紫燕,等. 宁夏枸杞果实糖积累和蔗糖代谢相关酶活性的关系[J]. 西北植物学报,2008,28(6):1172-1178.

[20] 曹兵,侯晶东,潘静,等. 宁夏枸杞不同器官中糖积累对大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增的响应[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):67-70.

CAO B,HOU J D,PAN J,*et al.* Effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on sugar accumulationof different organs in *Lycium barbarum*[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):67-70. (in Chinese)

[21] 许兴,杨涓,郑国琦,等. 盐胁迫对枸杞叶片糖代谢及相关酶活性的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(2):46-48.

[22] RUAN Y L,PATRICK J W. The cellular pathway of postphloem sugar-transport in developing tomato fruit[J]. Planta,1995,196(3):434-444.

[23] PEREZ-ALFOCEA F,ALBACETE A,GHANEM M E,*et al.* Hormonal regulation of source-sink relations to maintain crop productivity under salinity:a case study of root-to-shoot signalling in tomato[J]. Functional Plant Biology,2010,37(7):592-603.