

祁连山排露沟小流域土壤物理性质空间差异研究

王顺利, 刘贤德, 金 铭, 张学龙, 敬文茂, 罗龙发

(甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 研究了国家重点野外观测试验站——祁连山森林生态站排露沟流域土壤物理性质及其空间差异。结果表明: (1) 土壤容重随深度而变化, 变化幅度大小顺序为: 山地栗钙土> 山地森林灰褐土> 亚高山灌丛草甸土, 不同类型土壤容重变动在 $0.45 \sim 1.38 \text{ g/cm}^3$ 之间; (2) 土壤总孔隙度大小顺序为: 亚高山灌丛草甸土> 山地森林灰褐土> 山地栗钙土, 不同植被下土壤总孔隙度表现出不同的差异; 土壤毛管孔隙在不同植被下, 各层之间无显著性差异; 土壤非毛管孔隙, 山地栗钙土与亚高山灌丛草甸土和山地森林灰褐土之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。 (3) 土壤最大持水量大小顺序为: 山地森林灰褐土> 亚高山灌丛草甸土> 山地栗钙土; 毛管持水量与含水量均表现出亚高山灌丛草甸土> 山地森林灰褐土> 山地栗钙土, 各类型土壤含水量均随海拔的升高而增大。

关键词: 祁连山; 不同植被; 森林; 土壤物理性质; 空间差异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0081-06

中图分类号: S152.4

Soil Physical Characteristics in Pailugou Watershed of Qilian Mountains

WANG Shun-li, LIU Xian-de, JIN Ming, ZHANG Xue-long, JING Wen-mao, LUO Long-fa

(Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: Soil physical characteristics and its spatial variation were studied in Pailugou watershed located in Qilian Mountains Forest Ecology Monitoring Station belonging to the State Key Field Scientific Experimental Station. Results showed that (1) Soil physical characteristics changed with soil depth and the change extent was in the order of sub-alpine shrub meadow soil> forest gray-brown soil> chestnut soil. (2) Total soil porosity varied dramatically with different vegetation types. The total soil porosity of sub-alpine shrub meadow soil was higher than forest gray-brown soil, and in turn, chestnut soil. There was no significant difference in soil capillary porosity under different vegetations. For soil non-capillary porosity, there was significant difference among chestnut soil, sub-alpine shrub meadow soil, and forest gray-brown soil from the view point of geographical spatial difference ($P < 0.05$). (3) The soil water holding capacity of forest gray-brown soil was higher than sub-alpine shrub meadow soil and chestnut soil. As for soil capillary capacity, sub-alpine shrub meadow soil was the highest, followed by forest gray-brown soil and then chestnut soil. Soil non-capillary porosity varied dramatically with different degrees of vegetation cover. As for natural moisture content, sunny slope is significantly different among all vegetation types. Sub-alpine shrub meadow soil is the highest, followed by forest gray-brown soil and chestnut soil. Sub-alpine shrub soil had good structure and texture and greater potentiality for water conservation. Natural moisture content of all the soil types was increased with elevation.

Keywords: Qilian Mountains; different vegetation types; forest; soil physical property; significant difference

流域山地坡面上, 地形部位与土地利用方式是决定土壤物理性质变化的重要因素, 沿坡面不同的土壤成土过程导致了其特征的不同^[1]。由于不同地区在

气候、母岩、地形、植被和动物等方面的不同, 形成了各种土壤类型, 导致土壤性质存在明显的差异^[2-5]。即使土壤类型相同, 但在不同时间和不同空间上土壤

收稿日期: 2009-12-02

修回日期: 2010-03-20

资助项目: 十一五国家科技支撑计划重大项目“林业生态建设关键技术与示范”(2006BAD03A0702/wb06); 国家林业局林业公益性行业科研专项“西北典型区域基于水分管理的森林植被承载力研究”(200904056); 十一五重点项目“甘肃祁连山水源涵养林生态水文过程机理研究”(2006-78)

作者简介: 王顺利(1976—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 工程师, 主要从事森林生态、生态水文方面的研究。E-mail: wangshun123_78@163.com。

的某些性质仍然不同。这表明土壤具有时间上和空间上变化的特点。土壤空间差异是土壤重要的性质之一,在不同的尺度上研究土壤的空间差异,不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义,而且对了解植物与土壤的关系,如更新过程、养分和水分对根系的影响以及植物的空间格局等也具有重要的参考价值,许多学者对此开展了多项研究^[6-13]。近年来,土壤物理性质的空间差异性以及与植被状况的关系已成为国际上的研究热点之一^[14]。本研究旨在阐述祁连山森林土壤的主要物理性质及其特点;比较不同海拔、不同土壤层次以及不同利用方式下土壤物理性状,分析祁连山土壤物理指标的空间差异性;探讨土壤理化性质间的关系以及为人工促进林木更新和封山禁牧保护措施的实施提供理论依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在祁连山中段,位于甘肃省祁连山水源林生态系统定位研究站西水试验区排露沟流域($100^{\circ}17' - 100^{\circ}18' E$, $38^{\circ}32' - 38^{\circ}33' N$),海拔 2 640 ~ 3 796 m,流域面积为 2.74 km²,属高寒山地森林草原气候。根据该研究流域的气象站资料表明,区域年平均气温 0.5℃,极端最高气温 28.0℃,极端最低气温 - 36.0℃,7月平均气温 10.0℃~ 14.0℃;年降水 290.2~ 467.8 mm;年均蒸发量 1 051.7 mm;平均相对湿度 60%。(以上数据为 1994—2004 年气象观测资料)。土壤主要类型为山地森林灰褐土、山地栗钙土以及亚高山灌丛草甸土共 3 个类型,总的特征是土层薄、质地粗,以粉沙块为主;成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等,有机质含量中等, pH 值为 7.0~ 8.0。研究区土壤和植被类型随山地地形和气候的差异而形成明显的垂直分布带,青海云杉(*Picea crassifolia*)林是构成乔木层唯一建群种,以斑块状分布在阴坡、半阴坡。海拔 3 300 m 以上是以金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等为优势种的湿性灌木林。而阳坡、半阳坡则主要为山地草原(海拔 2 600~ 3 000 m),主要优势种有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex carexatrata*)和针茅(*Stipa* sp.)。

1.2 研究方法

1.2.1 长期固定样地设立 在研究流域选择具有代表性的 3 种植被类型青海云杉林、灌丛林(湿性灌木林)和草地分别设立长期固定样地 38 块,并对所设置的固定样地进行了详细调查。青海云杉林固定样地

(20 m × 20 m)在研究流域阴坡,海拔范围 2 700~ 3 300 m,主要土壤为山地森林灰褐土,土层平均厚 75 cm,乔木层主要建群种为青海云杉,郁闭度 0.7,平均树高 13 m,平均胸径 18 cm,树龄平均 90 a;灌丛林固定样地(5 m × 5 m)设在海拔 3 300~ 3 700 m,土壤类型为亚高山灌丛草甸土,土层平均厚度 50 cm,主要优势树种有金露梅、箭叶锦鸡儿和吉拉柳等,盖度平均为 60%,灌丛平均高 0.8 m;草地固定样地(1 m × 1 m)分布在海拔 2 700~ 3 000 m 流域阳坡,主要土壤类型为山地栗钙土,土层平均厚 80 cm,主要优势树种有珠牙蓼、针茅等,盖度平均为 75%,草本平均高 0.2 m。

1.2.2 土样采集与分析方法 在固定样地外侧挖掘土壤剖面 3 个,利用体积 200 cm³ 环刀取样,各个样点分层取原状土,每个测点 3 个重复,室内测定土壤质地、土壤容重、孔隙度以及持水性能等土壤物理性质。用常规方法采集和处理土壤样品^[15-17],取样时避免过大石砾,浸水称重时严格遵循规定的时间,烘干过程中控制温度 105℃左右,表层土壤在 80℃下烘干。

1.2.3 数据处理 收集祁连山森林生态站 2004—2008 年土壤物理性质测定资料,分类建立数据库。数据处理时,利用 Excel 和 SPSS 数据分析软件进行多元逐步回归分析与空间差异性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤质地

土样测定结果表明,祁连山排露沟试验流域亚高山灌丛草甸土为轻壤与重壤,剖面少有泥炭化表层,其下腐殖质层厚度 20—30 cm,成土母质主要为坡积残积物,含石砾较多,有机质含量 14%~ 20%,黑褐色在成土过程中,腐殖质积累明显,淋溶较强。植物生长茂密,盖度大,在 80%~ 90% 之间。根据成土过程和剖面特点,可分为腐殖质亚高山灌丛草甸土和亚高山灌丛草甸土两个亚类。

山地森林灰褐土为轻壤与中壤,由于森林覆盖度较大,腐殖质积累较厚,在成土过程中有腐殖质积累过程、钙化过程和淋溶过程,土壤一般无灰化和黏化现象,有机物分解活跃,土壤肥力较高。根据土壤剖面特征,分为山地淋溶灰褐色森林土,山地碳酸盐灰褐森林土和典型褐色森林土。

阳坡草地山地栗钙土多属中壤与砂壤,在表层有较多的腐殖质积累,其厚度在 40—60 cm,浅褐色,呈粒状或块状结构,根系多集中于此层,盘结很紧,有白色菌丝体形成。底土成粒状,结持力由紧变松,石灰性反应由上到下逐渐加剧,土层厚度一般 70—130 cm,栗钙土质较松。

2.2 土壤容重

祁连山排露沟流域亚高山灌丛草甸土因其所处海拔高度高,水分条件好,淋溶作用强,黏化层出现的部位较深,再加上强大的灌木层根系网,土壤孔隙度发达,所测深度内土壤容重普遍较小,土壤容重变化在 0.50~ 0.85 g/cm³ 之间,平均为 0.65 g/cm³;山地森林灰褐土土壤剖面层次化明显,质地由轻壤过渡到中壤,属团粒结构,质地疏松,容重较小,土壤容重变动在 0.45~ 1.38 g/cm³,平均为 0.85 g/cm³;山地栗钙土由于牧区牛羊的践踏,土壤表层容重较大,50 cm 内为轻壤粒状结构,容重相对较大。土壤容重变化在 0.93~ 1.20 g/cm³,平均为 1.07 g/cm³。土壤容重在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 各土层均呈现随深度增加而增大的趋势。从空间差异分析,各土壤类型间有显著性差异($P < 0.05$)。从大到小依次为:山地栗钙土> 山地森林灰褐土> 亚高山灌丛草甸土(图 1)。经测定,亚高山灌丛草甸土和山地森林灰褐土有机质含量偏高。亚高山灌丛草甸土 20—40 cm 土壤有机质含量为 16.59%,山地森林灰褐土 10—40 cm 有机质含量为 11.87%,山地栗钙土 0—40 cm 有机质含量仅为 2.19%。森林植物下土壤有机质主要来源于植物鲜体,而这些鲜体化学元素组成的差异,对土壤形成和发育有着深刻影响。综合分析可以看出,山地森林灰褐土和亚高山灌丛草甸土土壤容重普遍较低,远小于相应质地土壤的极限容重(土体坚实以致根系不能生长的最大容重值)。反映出祁连山青海云杉林地与高山灌丛土壤良好的结构和质地特征,以及其具有的较强涵养水源的潜力。

2.3 土壤孔隙度

2.3.1 土壤总孔隙度 从表 1 可以看出,随着土壤深度的变化,亚高山灌丛草甸土总孔隙度平均为 72.70%,山地森林灰褐土平均为 71.43%,山地栗钙土平均为 58.45%。从图 2 可以看出,随着海拔高度的变化,亚高山灌丛草甸土随着海拔的升高土壤总孔隙度逐渐增大;山地灰褐土有微小差别,0—10 cm 的土壤总孔隙度均大于下层的土壤总孔隙度;海拔 3 000 m 处,土壤总孔隙度呈现最大值,其值为 76.12%;山地栗钙土表现出随着海拔的升高总孔隙度逐渐增大的趋势,在海拔 2 700 和 2 800 m 其表层土壤的总孔隙度小于下层,海拔 2 900 和 3 000 m 则表现为表层土壤总孔隙度大于下层。总孔隙度平均从大到小顺序为:亚高山灌丛草甸土> 山地森林灰褐土> 山地栗钙土。从空间差异来看,不同植被下土壤总孔隙度表现出不同的差异,山地森林灰褐土和亚高山灌丛草甸土各层变化趋势相似,但与山地栗钙土显著性差异($P < 0.05$)。

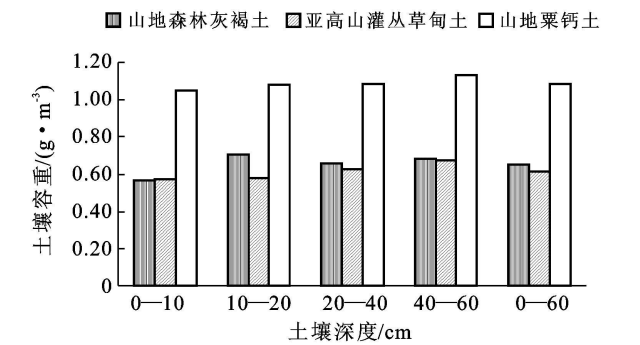


图 1 祁连山排露沟流域土壤容重随土壤深度变化

表 1 排露沟小流域不同土壤类型土壤物理性质随土壤深度的变化

土壤类型	土层/cm	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	最大持水量/ %	毛管持水量/ %	土壤含水量/ %
亚高山灌丛 草甸土	0—10	72.67	63.56	9.12	120.63	102.60	56.48
	10—20	72.08	60.59	11.48	115.04	94.28	57.21
	20—40	73.34	67.12	6.22	136.23	111.82	54.91
	0—40	72.70	63.76	8.94	123.97	102.90	56.20
山地森林 灰褐土	0—10	75.20	62.61	12.59	134.94	112.00	38.35
	10—20	70.75	63.83	6.92	99.35	92.75	42.00
	20—40	72.19	61.22	10.98	105.47	93.79	39.40
	40—60	71.49	59.58	11.91	109.39	91.46	41.82
	0—60	72.41	61.81	10.60	112.29	97.50	40.39
山地栗钙土	0—10	59.01	52.55	6.47	55.75	50.14	15.43
	10—20	58.23	53.29	4.94	54.10	49.59	17.21
	20—40	58.11	52.65	5.47	58.00	46.56	18.56
	0—40	58.45	52.83	5.63	55.52	49.84	16.52

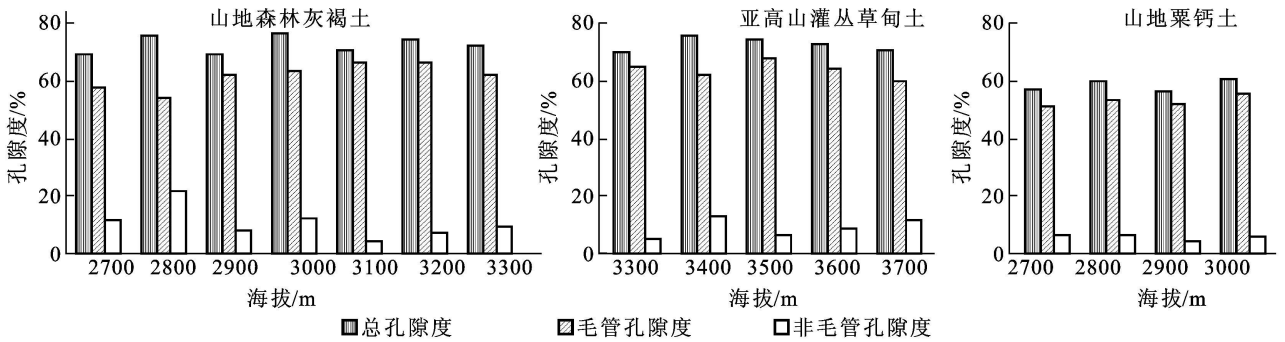


图 2 排露沟流域不同土壤类型土壤孔隙度比较

2.3.2 土壤毛管孔隙和非毛管孔隙 随着土壤深度的变化,亚高山灌丛草甸土土壤毛管孔隙平均为 63.76%,山地森林灰褐土平均为 61.68%,山地栗钙土平均为 52.83%;非毛管孔隙变化幅度分别为 8.94%,10.60%与 5.63%。除海拔 3 000 m 处下层土壤毛管孔隙小于表层土壤外,其余均表现出下层土壤毛管孔隙大于表层。除海拔 3 000 m 外均是表层土壤毛管孔隙大于下层。从空间差异分析,土壤毛管孔隙不同植被类型下,各层之间无显著性差异;土壤非毛管孔隙,山地栗钙土与亚高山灌丛草甸土和山地森林灰褐土之间有显著性差异($P < 0.05$)。

2.4 土壤持水状况

2.4.1 土壤最大持水量 从图 3 可以看出,亚高山灌丛草甸土最大持水量变化范围在 74.51%~165.23%,最大值出现在海拔 3 400 m,其次为海拔 3 500 m,海拔 3 300 m 处土壤最大持水量最小。这主要是由于祁连山降雨存在差异性,在海拔 3 400~

3 500 m 之间是降雨量的一个峰值(根据祁连山长期定位观测资料),这个阶段的灌丛林生长最好,土壤中根系的含量最多,从而影响土壤结构所致。山地森林灰褐土变化范围在 76.64%~171.46%,最大值出现在海拔 2 900~3 000 m 附近,最小值出现在 2 700 m。由于祁连山青海云杉林在 2 900~3 000 m 海拔范围内长势较好,林下苔藓枯枝落叶层较厚,土壤腐殖质层发育良好,故土壤最大持水量最大。2 700 m 土壤结构团粒状,土壤发生层次明显,质地为砂壤土,故土壤最大持水量较小。山地栗钙土变化为 45.96%~66.83%,最大值出现在海拔 3 000 m,最小值出现在海拔 2 900 m 处。土壤最大持水量山地森林灰褐土略大于亚高山灌丛草甸土,二者均大于山地栗钙土。

从空间差异来看,各不同植被下,不同海拔之间其总体趋势与土壤总孔隙一致。不同植被类型下土壤最大持水量表现出显著性差异($P < 0.05$)。

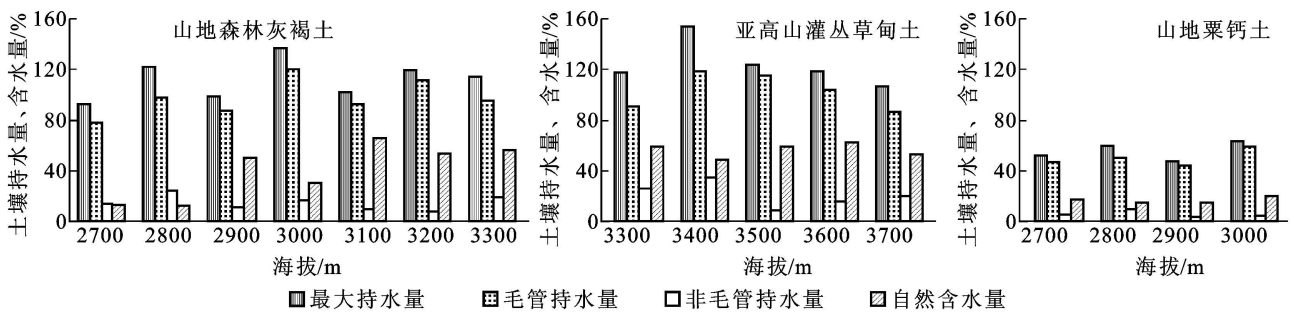


图 3 排露沟流域不同土壤类型持水情况

2.4.2 土壤毛管持水量和非毛管持水量 山地森林灰褐土土壤毛管持水量与最大持水量趋势一致,在 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 土层的土壤毛管持水量变化分别为 94.75%~157.88%,73.93%~120.29%,75.16%~109.39%和 67.08%~111.39%。

山地栗钙土在 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤毛管持水量变化分别为 44.84%~

61.91%,42.64%~56.39%和 43.14%~59.34%。亚高山灌丛草甸土在 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤毛管持水量变化分别为 82.53%~131.93%,70.27%~115.86%和 77.15%~121.11%。亚高山灌丛草甸土土壤毛管持水量最大,山地森林灰褐土次之,山地栗钙土最差。毛管持水量随着海拔的升高有增大的趋势,在同一海拔高度下,土壤毛管持水量表层大于底层。

不同植被下土壤非毛管孔持水量有显著性差异 ($P < 0.05$), 山地森林灰褐土、山地栗钙土以及亚高山灌丛草甸土土壤非毛管持水量土壤上下层之间有显著性差异 ($P < 0.05$), 非毛管持水量表现为: 亚高山灌丛草甸土 > 山地森林灰褐土 > 山地栗钙土, 山地森林灰褐土在海拔 2 700~3 000 m 土壤非毛管持水量大于海拔 3 000~3 300 m 土壤的非毛管持水量, 各海拔段土壤均出现 0—10 cm 和 40—60 cm 的非毛管持水量大于中间层土壤非毛管持水量。亚高山草甸土随着土层深度的增加土壤非毛管持水量依次减小, 山地栗钙土各层次之间无明显变化。0—20 cm 层土壤非毛管持水量亚高山灌丛 3 400 m 最大, 与森林灰褐土、山地栗钙土之间有显著性差异 ($P < 0.05$), 20—40 cm 层土壤非毛管持水量森林灰褐土 3 000 m 最大, 与其它不同类型土壤间有显著性差异 ($P < 0.05$), 40—60 cm 层土壤非毛管持水量亚高山灌丛草甸土 3 300 m 最大, 但其土壤类型内变异也大, 与其它土壤类型间无显著性差异。

2.4.3 土壤含水量 通过对祁连山森林生态站排露沟流域 2004—2008 年定位观测数据的分析, 祁连山不同植被下土壤含水量, 山地森林灰褐土在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm 和 40—60 cm 各土层土壤含水量的变化范围分别为 9.67%~65.76%, 12.15%~66.11%, 14.14%~61.28% 和 14.15%~68.76%; 亚高山灌丛草甸土在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层土壤含水量的变化范围分别为 46.79%~62.86%, 46.77%~71.38% 和 51.42%~59.72%; 山地栗钙土在 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 各土层土壤含水量的变化范围分别为 13.78%~19.77%, 15.51%~19.84% 和 14.75%~19.56%。从林下土壤剖面差异来看, 几种不同植被下土壤含水量基本上表现为: 表层土大于底层, 这可能与祁连山苔藓枯落物层截留降水, 再缓慢释放有关。森林灰褐土上下层之间土壤含水量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。从空间差异来看, 0—20 cm 层土壤含水量顺序为: 亚高山灌丛草甸土 > 森林灰褐土 > 山地栗钙土; 20—40 cm 层土壤含水量亚高山灌丛草甸土最大, 与其它类型土壤间有显著性差异 ($P < 0.05$)。此外, 祁连山几种主要植被下土壤含水量与土壤最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量均达到极显著水平, 各林地土壤含水量的大小主要取决于最大持水量, 即与总孔隙有关。

3 结论

(1) 祁连山排露沟典型小流域的土壤分布随海

拔升降、水热变化状况、坡向的阴阳等因素的变化具有明显的垂直带谱, 同时随纬度和坡向等的不同, 土壤物理性质也具有明显的空间差异。山地森林灰褐土和亚高山灌丛草甸土由于森林作用土壤有机质含量高, 疏松、持水能力强、透气性好, 山地栗钙土持水能力较差, 通气不良。亚高山灌丛草甸土与山地森林灰褐土均随着海拔升高, 土壤容重增大, 亚高山灌丛草甸土土壤容重的增幅大于山地森林灰褐土。研究土壤的土壤含水量均随海拔升高而增大。

(2) 亚高山灌丛草甸土为分布在研究流域 3 300~3 800 m 森林郁闭线以上高寒灌丛植被下发育的高寒均腐殖质土。因其成土环境降水丰沛, 生草旺盛, 淋溶作用强, 但土壤温度低, 冻结期长, 冻层季节滞水, 导致表面有机质分解缓慢, 底土层进行氧化还原, 成土过程有腐殖质积累过程和融冻过程, 土壤主要诊断层有腐殖质层和黏化层。剖面少有泥炭化表层, 其下腐殖质层厚度 20—30 cm, 成土母质主要为坡积残积物, 含石砾较多, 有机质含量 14%~20%, 黑褐色在成土过程中, 腐殖质积累明显, 淋溶较强。植物生长茂密, 盖度大, 在 80%~90% 之间。土壤物理性质差异主要体现在生态环境极度恶劣, 土体不稳定, 多大石砾, 土壤结构发育不完整, 生物作用时间较短, 但土壤物理性状综合表现较好。

(3) 山地森林灰褐土, 分为山地淋溶灰褐色森林土, 山地碳酸盐灰褐森林土和典型褐色森林土。主要分布在研究流域的阴坡、半阴坡海拔 2 600~3 350 m 的山地。为森林、森林草原或森林(灌丛)草甸条件下形成的土壤, 具湿润、半干润土壤水分状况。由于森林覆盖度较大, 腐殖质积累较厚, 在成土过程中有腐殖质积累过程、钙化过程和淋溶过程, 土壤一般无灰化和黏化现象, 有机物分解活跃, 土壤肥力较高, 生物作用时间长, 土壤物理性质较好。

(4) 山地栗钙土主要分布在海拔 2 700~3 000 m 的阳坡、半阳坡草地。成土母质为黄土和坡积砾石, 表层有较多的腐殖质积累, 浅褐色, 呈粒状或块状结构, 根系多集中于此层, 盘结很紧, 有白色菌丝体形成。石灰性反应由上到下逐渐加剧, 土层厚度一般为 30—130 cm, 山地栗钙土土质比较松, 多属轻壤或砂壤。其植被个体较小, 改变土壤性状的能力弱, 土壤物理性质较差。加之人为干扰, 使得生态系统体现出脆弱性和不稳定性; 由于严重超载, 过度放牧, 使阳坡草地土壤退化严重, 土壤表层孔隙度减小, 土壤结构遭到破坏。

[参 考 文 献]

- [1] 傅伯杰, 杨志坚, 王仰麟, 等. 黄土丘陵地区土壤水分空间分布数学模型[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(3): 185-191.
- [2] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [3] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. Adv. Soil Sci., 1985, 3: 1-7.
- [4] Martinez M M, Williams A G, Ternan J L, et al. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment[J]. Soil & Till. Res., 1998, 48: 71-80.
- [5] Keck T J, Quimby W F, Nielsen G A. Spatial distribution of soil attributes on reconstructed mine soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 782-786.
- [6] 王金叶, 田大伦, 王彦辉, 等. 祁连山林草复合流域土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 144-147.
- [7] 程金花, 张洪江, 余新晓, 等. 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 45-49.
- [8] 党坤良. 秦岭火地塘林区不同林地土壤水分动态特征的研究[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(1): 1-8.
- [9] 张志强, 王礼先. 水力侵蚀与植被变化关系研究途径与展望[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(S): 177-180.
- [10] 张学龙, 车克钧, 王金叶, 等. 祁连山寺大隆林区土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(1): 1-9.
- [11] 车克钧, 傅辉恩. 祁连山北坡水文效应的多层次 Fuzzy 综合评判[J]. 生态学杂志, 1993, 12(3): 31-35.
- [12] 金铭, 张学龙, 刘贤德, 等. 祁连山林草复合流域灌木土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 36(1): 169-172.
- [13] 成彩霞, 张学龙, 刘占波, 等. 祁连山西水林区土壤水分物理性质特征分析[J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 28(4): 33-38.
- [14] 庞学勇, 包维楷, 张咏梅, 等. 岷江柏林下土壤物理性质及其地理空间差异[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(5): 596-601.
- [15] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986. 17-55.
- [16] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 84-166.
- [17] 田大伦. 杉木林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 103-156.

(上接第 80 页)

[参 考 文 献]

- [1] Evans J. Plantation forestry in the tropics[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1997.
- [2] 李丽, 惠刚盈, 惠淑荣, 等. 不同样地大小对天然林林分的密度估计和格局分析影响研究[J]. 科技导报, 2007, 25(9): 40-41.
- [3] 童书振, 盛伟彤, 张建国. 杉木林分密度效应研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 66-75.
- [4] 林建华. 马尾松造林密度与林分生长效应试验[J]. 福建林业科技, 2005, 32(13): 137-139.
- [5] 叶功富, 林武性, 张水松, 等. 不同密度管理措施对杉木林分的生长、生态效应的研究[J]. 福建林业科技, 1995, 22(3): 1-8.
- [6] 鲁少波, 徐成立, 李春强, 等. 孟滦林管局森林生态系统服务功能价值研究[J]. 林业经济, 2009(4): 65-66.
- [7] 王梅, 张文辉. 不同密度油松人工林生长更新现状及群落结构[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(7): 76-77.
- [8] 沈红莉, 崔长占, 毕士忠, 等. 落叶松人工林最适密度的探讨[J]. 高师理科学刊, 1999, 19(2): 41.
- [9] Harper J L. Population biology of plants [M]. London: Academic Press, 1977: 42.
- [10] Drew T J, Flewelling J W. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantation [J]. Forest Science, 1979, 25: 518-532.
- [11] 李桂君, 吴燕, 左焕发. 红松阔叶人工天然混交林主要树种胸径与冠幅的相关分析[J]. 林业勘察设计, 2005(1): 68-70.
- [12] 罗玲, 廖超英. 榆林沙区樟子松冠幅与胸径的相关关系分析[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(24): 92-97.
- [13] 韩照日格图, 白静, 田有亮, 等. 大青山区油松人工林密度对林木生长影响的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(4): 68-69.
- [14] 阎海平, 谭笑, 孙向阳, 等. 北京西山人工林群落物种多样性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 16-19.
- [15] 唐守正, 杜纪山. 利用树冠竞争因子确定同龄间伐林分的断面积生长过程[J]. 林业科学, 1999, 35(6): 35-41.
- [16] 韩俊仪. 关于落叶松人工林抚育间伐的探讨[J]. 内蒙古林业调查设计, 2000(3): 60-62.