

# 不同林分类型土壤水分物理性质及其海拔效应 ——以浙江省凤阳山为例

田月亮<sup>1</sup>, 张金池<sup>1</sup>, 李海东<sup>2</sup>, 庄加尧<sup>1</sup>, 叶立新<sup>3</sup>, 刘胜龙<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 3. 凤阳山自然保护区, 浙江 龙泉 323700)

**摘要:**以浙江省凤阳山常绿阔叶林和针阔混交林为例,通过野外调查和室内测定土壤容重、土壤孔隙度及土壤含水量等,研究了中亚热带主要林分类型的土壤水分物理性质及其海拔影响。结果表明,在 0—60 cm 土层中,随着深度的增加土壤容重逐渐增大,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、最小持水量逐渐减小。在海拔 300~1 355 m 高程范围随着海拔升高土壤容重平均值逐渐减小,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、最小持水量、土壤贮水量平均值均增大;土壤排水能力平均值为:海拔 900 m>海拔 600 m>海拔 1 355 m>海拔 300 m。同一海拔 4 种林分类型土壤容重平均值:人工杉木林>针阔混交林>人工柳杉林>常绿阔叶混交林;土壤总孔隙度、土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、土壤贮水量平均值均表现为人工柳杉林优于其他 3 种林分类型;土壤排水能力平均值表现为:常绿阔叶混交林>人工杉木林>人工柳杉林>针阔混交林。综合分析,同一海拔常绿阔叶林水源涵养及保持水土能力要高于人工柳杉林。

**关键词:**土壤持水量;孔隙度;容重;海拔高度;林分类型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0053-05

中图分类号: S714.2

## Physical Characteristics of Soil Moisture and Their Altitude Effects for Different Forest Stand Types in Fengyang Mountains of Zhejiang Province

TIAN Yue-liang<sup>1</sup>, ZHANG Jin-chi<sup>1</sup>, LI Hai-dong<sup>2</sup>, ZHUAN Jia-yao<sup>1</sup>, YE Li-xin<sup>3</sup>, LIU Sheng-long<sup>3</sup>

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu 210042, China; 3. Fengyang Mountain Natural Reserve, Longquan, Zhejiang 323700, China)

**Abstract:** By taking evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests in the Fengyang Mountains of Zhejiang Province for an instance, the physical characteristics of soil moisture and its effects for the main different forest stand types in the mid subtropical zone are studied through field survey and laboratory measurements for soil bulk density, soil porosity and soil moisture content. Between 0 and 60 cm soil layer, soil bulk density rises gradually and total soil pore space, capillary porosity, maximum holding capacity, capillary water capacity and minimum water holding capacity decrease gradually, as soil depth increases. Between 300 and 1 355 m altitude rank, the averaged value of soil bulk density decreases gradually and the averaged values of total soil pore space, capillary porosity, maximum holding capacity, capillary water capacity, the average water holding capacity and soil water capacity increase, respectively, as the altitude increase. The averaged values of soil drainage ability for the four forest stand types rank in the order of 900 m altitude > 600 m altitude > 1 355 m altitude > 300 m altitude. The averaged values of soil bulk density for the four forest stand types at the same altitude rank in the order of Chinese fir plantation > coniferous broad-leaved mixed forest > *Cryptomeria fortunei* plantation > evergreen broad-leaved mixed forest. *Cryptomeria fortunei* plantation is superior to the other three forest stand types in the averaged values of the total soil pore space, the

收稿日期: 2012-01-08

修回日期: 2012-03-24

资助项目: 国家公益性行业科研专项“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005)

作者简介: 田月亮(1985—),男(满族),内蒙古自治区赤峰市人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: tianjuan0626@163.com。

通信作者: 张金池(1962—),男(汉族),山东省自治区安丘市人,教授,博士生导师,博士,主要从事水土保持、林业生态工程研究。E-mail: nfuajzhang@sina.com。

maximum soil water holding capacity, capillary water capacity, the minimum water holding capacity and water capacity. The averaged values of soil drainage ability rank in the order of evergreen broad-leaved mixed forest > Chinese fir plantation > *Cryptomeria fortunei* plantation > coniferous broad-leaved mixed forest. In summary, the water conservation and soil water conservation abilities of evergreen broad-leaved mixed forest are higher than those of *Cryptomeria fortunei* plantation at the same altitude.

**Keywords:** soil water holding capacity; porosity; bulk density; altitude; forest stand type

森林的水源涵养功能是森林生态系统的重要功能之一,不同林分类型由于其树种生物学特性与林分结构的不同,其林分的水源涵养效应存在一定的差异<sup>[1-3]</sup>。森林土壤是森林发挥水文调节作用的主要场所<sup>[4]</sup>。森林土壤层的水文生态效应常因森林土壤类型的不同而不同,而土壤的物理性质对土壤层的水文生态效应具有极其显著的影响<sup>[4-7]</sup>。由于水土流失比较严重,近年来,土壤水分物理性质的研究成为热点问题<sup>[8]</sup>。有关森林土壤水分物理性质的研究,常见于不同林分类型之间比较<sup>[2-9]</sup>,而对于海拔与林分类型土壤物理之间关系研究较少。通过对不同海拔林地土壤水分物理性质的研究,有助于合理利用森林,提高土壤保水通气的能力,为系统阐明森林土壤生态功能与特征,进一步研究该地区典型植被类型的水文机理以及正确评价流域的水文生态效益提供一定的理论依据。

## 1 研究区概况

凤阳山位于浙江省龙泉市南部,地理坐标为北纬 $27^{\circ}46'$ — $27^{\circ}58'$ ,东经 $119^{\circ}06'$ — $119^{\circ}15'$ 。属于中亚热带温暖湿润气候区,同时受季风影响明显。年均气温 $17\sim 21^{\circ}\text{C}$ ,最热月均温在 $28^{\circ}\text{C}$ 左右,最冷月为 $6\sim 13^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 $2\,438\text{ mm}$ ,年蒸发量 $1\,171\text{ mm}$ ,活动积温约 $6\,500^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 $275\text{ d}$ 。天然植被以常绿阔叶林和针叶林为主,植被类型和区系成分复杂。主要植物种有木荷(*Schima superba* Gardn),马尾松(*Pinus massoniana* Lamb),杉木(*Cunninghamia lanceolata*),柳杉(*Cryptomeria fortunei*),短柄枹(*Quercus glandulifera*),光皮桦(*Betula luminiifera*),苦楝(*Melia azedarach* Linn),黄山松(*Pinus taiwanensis* Hayata),秀丽四照花(*Cornus ele-*

*gans*),多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis* Cheng),水丝梨(*Sycopsis*),黄山木兰(*Magnolia cylindrica* Wils),板栗(*Castanea mollissima*)等。

## 2 研究方法

2011年8—9月,在海拔 $300\sim 1\,500\text{ m}$ 高程范围内选取4种具有代表性的林分类型,利用罗盘仪设置7块 $20\text{ m}\times 60\text{ m}$ 的永久样地,其中常绿针阔混交林4块、常绿阔叶混交林1块、人工杉木林1块和人工柳杉林1块(表1)。在各样地进行每木检尺,调查胸径 $\geq 5\text{ cm}$ 以上乔木的树种组成、林分密度、高度、胸径等,并对林下植被进行生物学调查。

在每个样地的中下坡地段分别挖掘3个土壤剖面,共计21个。按土壤发生层次,采用容积 $100\text{ cm}^3$ 的环刀分别取 $0\sim 20$ , $20\sim 40$ 和 $40\sim 60\text{ cm}$ 原状土样,同时用铝盒取土,每层3个重复。通过环刀法测定土壤容重、质量湿度、孔隙度、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度等物理性质<sup>[4]</sup>,用烘干法测定土壤含水量。根据《森林土壤水分物理性质测定标准》测定不同样地的土壤最大持水量(mm)、毛管持水量(mm)、最小持水量(mm)<sup>[5]</sup>。并用以下公式计算土壤持水量、排水能力和土壤土壤贮水量:

$$\text{最大持水量} = 0.1 \times \text{土层厚度} \times \text{土壤容重} \times$$

$$\text{最大持水量/水的密度}$$

$$\text{毛管持水量} = 0.1 \times \text{土层厚度} \times \text{土壤容重} \times$$

$$\text{毛管持水量/水的密度}$$

$$\text{最小持水量} = 0.1 \times \text{土层厚度} \times \text{土壤容重} \times$$

$$\text{最小持水量/水的密度}$$

$$\text{排水能力} = \text{最大持水量} - \text{最小持水量}$$

$$\text{土壤贮水量} = 0.1 \times \text{质量湿度}(\text{质量}\%) \times$$

$$\text{土壤容重} \times \text{土层厚度/水的密度}$$

表1 不同林分类型各调查样地的基本情况

样地	林分类型	海拔高度/m	坡向	坡度/( $^{\circ}$ )	林龄/a	郁闭度	树种组成/棵
Z <sub>1</sub>	针阔混交林	300±10	北	5~7	45±3	0.78	木荷 55, 马尾松 50, 杉木 16
Z <sub>2</sub>	针阔混交林	600±10	西	31~40	40±3	0.81	杉木 58, 光皮桦 7, 苦楝 13 等
Z <sub>3</sub>	针阔混交林	900±10	东	35~42	40±3	0.83	杉木 34, 黄山松 20 木荷 120 等
Z <sub>4</sub>	针阔混交林	1 355±10	南	14~16	30±4	0.84	杉木 140, 短柄枹 23, 秀丽四照花 28 等
Z <sub>5</sub>	常绿阔叶混交林	1 500±10	东	13~18	30±4	0.81	多脉青冈 44, 木荷 58, 水丝梨 21 等
Z <sub>6</sub>	人工杉木林	1 419±10	南	12~15	25±5	0.73	杉木 195, 黄山木兰 3
Z <sub>7</sub>	人工柳杉林	1 487±10	东北	5~17	55±5	0.63	柳杉 148, 木荷 8, 板栗 3 等

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤容重与海拔高度的关系

由图 1 可见,不同海拔和林分类型的土壤容重均随着土壤深度的增加而增大。不同海拔林地土壤容重为  $0.66 \sim 1.22 \text{ g/cm}^3$ ,其中海拔 300 m 各层土壤容重均最大,不同海拔针阔混交林林地土壤容重的平均值分别为海拔 300 m ( $1.10 \text{ g/cm}^3$ ) > 600 m ( $1.02 \text{ g/cm}^3$ ) > 900 m ( $0.85 \text{ g/cm}^3$ ) > 1 355 m ( $0.76 \text{ g/cm}^3$ )。就土壤容重的海拔梯度变化而言,不

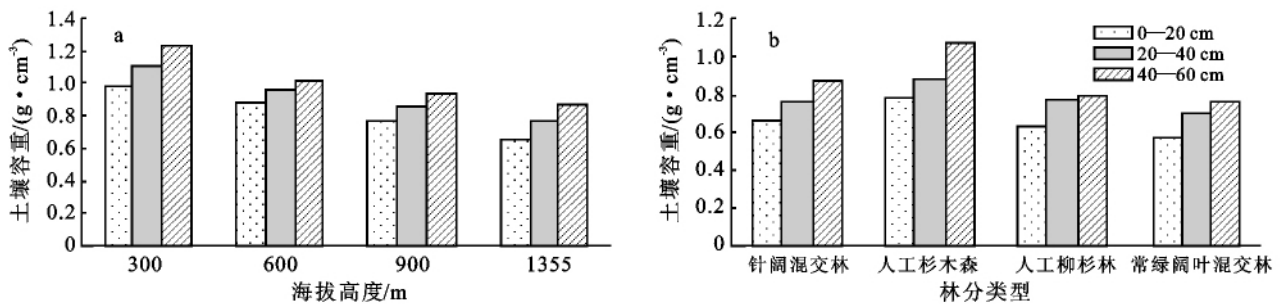


图 1 土壤容重与海拔高度和林分类型的变化

同一海拔 4 种林分类型土壤容重最大值  $1.08 \text{ g/cm}^3$ ,最小值  $0.575 \text{ g/cm}^3$ (图 1b)。其中,不同林分类型 0—60 cm 土壤容重的平均值表现为:人工杉木林 ( $0.91 \text{ g/cm}^3$ ) > 针阔混交林 ( $0.76 \text{ g/cm}^3$ ) > 人工柳杉林 ( $0.74 \text{ g/cm}^3$ ) > 常绿阔叶混交林 ( $0.68 \text{ g/cm}^3$ ),人工杉木林土壤容重均值是常绿阔叶混交林的 1.36 倍。呈现这种规律主要与林分类型树种搭配,树种多少,形成林分年龄及林下草灌密度相关,人工杉木林林龄 20~30 a 时,树种比较单一,地面草本植物及灌木较少,影响土壤孔隙度。土壤容重较大;人工柳杉林林龄较长,形成的枯枝落叶层较厚,经过长期的自然分解改变了土壤的理化性质,土壤容重较小。常绿阔叶混交林树种较多,地面覆盖度较大,草本及灌木较多,相对土壤容重最小。

#### 3.2 土壤孔隙度与海拔高度关系

同种林分类型不同海拔林地土壤总孔隙度值在  $41.13\% \sim 67.62\%$ ;土壤总孔隙度平均值表现为:海拔 1 355 m ( $63.87\%$ ) > 900 m ( $63.26\%$ ) > 600 m ( $55.75\%$ ) > 300 m ( $43.90\%$ ),海拔 1 355 m 土壤总孔隙度平均值为海拔 300 m 的 1.45 倍(表 2)。土壤毛管孔隙度平均值表现为:海拔 1 355 m ( $52.21\%$ ) > 900 m ( $41.46\%$ ) > 600 m ( $38.58\%$ ) > 300 m ( $33.66\%$ ),海拔 1 355 m 土壤毛管孔隙度平均值为海拔 300 m 的 1.53 倍。随着土层深度增加总孔隙度与毛管孔隙度逐渐减小;非毛管孔隙度层次之间无规

律变化;非毛管孔隙度与总孔隙度的比值,在 0—60 cm 的平均值来看,针阔混交林表现为:海拔 900 m ( $0.35$ ) > 600 m ( $0.30$ ) > 300 m ( $0.23$ ) > 1 355 m ( $0.18$ )。一般认为,土壤中大小孔隙同时存在,若总孔隙度在 50%左右,毛管与非毛管孔隙度的比值在 1.5~4.1 时,透水性、通气性和持水能力比较协调<sup>[6-10]</sup>。若非毛管孔隙度在 6%~10%时,林木生长一般;在 10%~15%时,林木生长中等;大于 15%时,林木生长良好<sup>[11]</sup>。因此说明 1 355 m 针阔混交林土壤透气性最好,而 900 m 针阔混交林土壤透气性最差。出现上述结果主要因为人为干扰土壤容重,与树种多少,树龄大小以及坡度密切相关。海拔 1 355 m 人为干扰较少,形成林分时间较长,树种较多,草灌及枯枝落叶层密集,海拔 900 m 由于地形、人工采伐及牲畜活动不利于土壤改善、水土保持及水源涵养。

同深度土壤容重均随着海拔升高而减小。不同海拔林地土壤容重呈现这种变化趋势,这与人为活动和形成天然林树种搭配有关。海拔 300 m 针阔混交林形成的林龄 40,50 a,根系较大,树种为 3 种,地表草本层稀少。

长期以来人们取柴及踩踏造成土壤紧实,树种单一形成的苦枝落叶更不能有效地改善土壤。海拔 1 355 m 针阔混交林树种较多,形成的枯枝落叶层较厚,地表草本植物较多,人为干扰较少,长期以来林分有效地改善了土壤容重。

同一海拔 4 种不同林分类型林地土壤总孔隙度和毛管孔隙度均表现为随着土层深度的增加而逐渐减小(表 3),非毛管孔隙度人工柳杉林逐渐减小,其余林分类型无规律变化;土壤非毛管孔隙度与总孔隙度比值在 0.1~0.39,常绿阔叶混交林与针阔混交林土壤非毛管孔隙度与总孔隙度比值随着土层深度增加逐渐变大,人工柳杉林变小;4 种林分类型土壤总孔隙度平均值:人工柳杉林 ( $83.20\%$ ) > 常绿阔叶混交林 ( $76.51\%$ ) > 人工杉木林 ( $69.56\%$ ) > 针阔混交林 ( $63.92\%$ ),人工柳杉林是针阔混交林的 1.30 倍。

毛管孔隙度平均值:人工柳杉林(73.93%)>常绿阔叶混交林(60.71%)>人工杉木林(54.60%)>针阔混交林(52.21%),人工柳杉林是针阔混交林的 1.42 倍。这与前人研究存在差别<sup>[9,12-13]</sup>;出现差别的原因是此地区人工杉木林地处高海拔,林分无人干扰,形成枯枝落叶层较厚,土壤总孔隙度和毛管孔隙度较大。非毛管孔隙度平均值:针阔混交林(22.46%)>常绿阔叶混交林(15.80%)>人工杉木林(14.96%)>人工柳杉林(9.28%),针阔混交林是人工柳杉林的 2.42 倍。呈现这种规律说明柳杉林要优于其他 3 中林分类型,针阔混交林较差,不利于水源涵养和保持水土。

表 2 同种林分类型不同海拔林地土壤孔隙度

海拔/m	土层深度/cm	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/总孔隙度
300±10	0—20	47.03	35.91	11.12	0.24
	20—40	43.53	32.43	11.10	0.25
	40—60	41.13	32.65	8.49	0.21
	0—20	61.51	40.95	20.57	0.33
600±10	20—40	53.40	38.27	15.13	0.28
	40—60	52.35	36.51	15.84	0.30
	0—20	64.23	45.49	20.74	0.31
900±10	20—40	63.35	41.22	22.13	0.35
	40—60	62.19	37.68	24.52	0.39
	0—20	67.62	57.39	10.23	0.15
1 355±10	20—40	63.03	53.17	9.86	0.16
	40—60	60.95	46.06	14.9	0.24

表 3 同一海拔不同林分类型林地土壤孔隙度

植被类型	土层深度/cm	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/总孔隙度
常绿阔叶混交林	0—20	81.23	73.39	7.84	0.10
	20—40	79.97	62.74	17.23	0.22
	40—60	68.34	46.00	22.34	0.33
针阔叶混交林	0—20	67.62	57.39	10.23	0.15
	20—40	63.03	53.17	9.86	0.16
	40—60	60.95	46.06	14.90	0.24
人工杉木林	0—20	82.21	66.45	15.76	0.19
	20—40	78.16	56.81	21.36	0.27
	40—60	48.32	40.55	7.77	0.16
人工柳杉林	0—20	84.94	76.94	14.80	0.17
	20—40	81.88	74.71	7.18	0.09
	40—60	80.79	70.14	5.85	0.07

### 3.3 土壤水文性能与海拔之间的关系

不同海拔 4 种林分类型随着土层深度增加土壤持水量呈下降趋势(表 4),其中,0—20 cm 土层最大

持水量高达 107%,毛管持水量高达 84.77%,最小持水量达 38.79%;土壤最大持水量平均值为:海拔 1 355 m(89.70%)>900 m(75.81%)>600 m(55.66%)>300 m(40.31%),海拔 1 355 m 的土壤最大持水量平均值是海拔 300 m 的 2.23 倍。毛管持水量平均值为:1 355 m(71.51%)>900 m(49.36%)>600 m(38.34%)>300 m(30.87%),海拔 1 355 m 毛管持水量平均值是 300 m 的 2.28 倍。最小持水量平均值为:1 355 m(67.39%)>900 m(45.79%)>600 m(35.97%)>300 m(28.62%),海拔 1 355 m 最小持水量平均值是 300 m 的 2.35 倍。

表 4 同种林分类型不同海拔林地土壤水文性能

海拔/m	土层深度/cm	最大持水量/%	毛管持水量/%	最小持水量/%	排水能力/mm	土壤贮水量/mm
300±10	0—20	47.99	36.64	32.39	30.70	40.11
	20—40	39.22	29.22	27.01	27.08	41.76
	40—60	33.71	26.76	26.46	17.68	52.47
600±10	0—20	62.77	41.78	39.77	42.65	61.68
	20—40	52.38	37.10	35.02	32.62	67.24
	40—60	51.83	36.15	33.12	37.98	56.46
900±10	0—20	86.02	59.08	56.43	45.99	67.50
	20—40	74.53	48.50	46.33	48.01	60.51
	40—60	66.88	40.51	34.62	59.97	68.42
1 355±10	0—20	107.00	84.77	75.07	29.58	80.54
	20—40	82.93	69.96	68.79	21.67	75.45
	40—60	79.16	59.81	58.32	31.66	54.33

土壤排水能力平均值为:海拔 900 m(45.79%)>600 m(37.75%)>1 355 m(27.64%)>300 m(25.15%),海拔 900 m 土壤排水能力平均值是海拔 300 m 的 1.82 倍。土壤贮水量平均值为:海拔 1 355 m(70.11 mm)>900 m(65.48 mm)>600 m(61.79 mm)>300 m(44.78 mm),海拔 1 355 mm 土壤贮水量平均值为海拔 300 mm 的 1.57 倍。持水量变化较大的为海拔 1 355 m 针阔混交林,随着海拔升高在 0—60 cm 土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、土壤贮水量平均值逐渐增加。土壤含水量呈现这种变化与土壤有机质、土壤动物形成的孔隙、植物根系、死亡根系形成的根孔都随深度而降低有关<sup>[14]</sup>。在海拔 300 m 人为干扰林分较大,长期的踩踏使土壤紧实度相对增加,土壤孔隙度减小,进而土壤含水量相对最小;海拔 1 355 mm 组成林分树种较多,枯枝落叶层较厚,孔隙度大,土壤含水量相对最大。

同一海拔 4 种林分类型土壤最大持水量随着深度的增加而逐渐减小(表 5)。土壤最大持水量 122.72%

~47.74%,毛管持水量 99.60%~37.54%,最小持水量 94.44%~34.62%。最大持水量平均值:人工柳杉林(117.05%)>常绿阔叶混交林(115.06%)>针阔混交林(89.70%)>人工杉木林(80.11%),人工柳杉林是人工杉木林的 1.46 倍。毛管持水量平均值:人工柳杉林(96.46%)>常绿阔叶混交林(92.93%)>针阔混交林(67.39%)>人工杉木林(62.80%),人工柳杉林是人工杉木林的 1.53 倍。最小持水量平均值:人工柳杉林(91.56%)>常绿阔叶混交林(86.78%)>针阔混交林(67.39%)>人工杉木林(62.35%),人工柳杉林是人工杉木林的 1.47 倍。常绿阔叶混交林随着土层深度增加毛管持水量和最小持水量逐渐增大,其余 3 种林分类型逐渐减小。4 种林分类型土壤方差分析:常绿阔叶混交林最大持水量方差最小(8.33),人工杉木林方差最大(678.67),常绿阔叶混交林各层土壤在 0—60 cm 最大持水量相差最小,人工杉木林最大;说明人工杉木林在各层土壤有明显差异。

表 5 同一海拔不同林分类型林地土壤水文性能

植被类型	土层深度/cm	最大持水量/%	毛管持水量/%	最小持水量/%	排水能力/mm	土壤贮水量/mm
常绿阔叶混交林	0—20	118.85	88.00	79.28	56.31	73.20
	20—40	115.06	90.27	84.78	39.09	98.50
	40—60	111.27	100.53	96.28	21.87	123.81
针叶阔叶混交林	0—20	107.00	84.77	75.07	29.58	80.54
	20—40	82.93	69.96	68.79	21.67	75.45
	40—60	79.16	59.81	58.32	31.66	54.33
人工杉木林	0—20	106.77	86.30	85.88	32.12	123.32
	20—40	88.82	64.55	63.65	40.97	98.72
	40—60	44.74	37.54	37.52	15.93	80.75
人工柳杉林	0—20	122.72	99.60	94.44	36.61	111.60
	20—40	115.65	96.39	92.92	19.55	135.42
	40—60	112.79	93.39	87.33	27.45	130.60

土壤排水能力 14.66~59.97 mm。随着土层深度增加常绿阔叶混交林排水能力逐渐减小,土壤贮水量逐渐增大,与前人研究得出的规律一致<sup>[6-12]</sup>;针阔混交林排水能力逐渐增大,土壤贮水量也增大,4 种林分类型土壤排水能力平均值:常绿阔叶混交林(39.09 mm)>人工杉木林(29.67 mm)>人工柳杉林(27.87 mm)>针阔混交林(27.63 mm);土壤贮水量 135.42~54.33 mm。土壤贮水量平均值:人工柳杉林(125.87 mm)>人工杉木林(100.93 mm)>常绿阔叶混交林(98.50 mm)>针阔混交林(70.10 mm)。综上所述,土壤各层排水能力大说明土壤

的贮水量越小,土壤贮水量小不利于水源涵养,当降雨量达到一定程度就会产生地表径流,造成水土流失。

## 4 结论

(1) 0—60 cm 土层同种林分类型随海拔升高林地土壤容重平均值逐渐减小;土壤总孔隙度的平均值和毛管孔隙度平均值逐渐增大,随土层深度增加总孔隙度与毛管孔隙度逐渐减小;非毛管孔隙度与总孔隙度比值的平均值:针阔混交林海拔 900 m > 海拔 600 m > 海拔 300 m > 海拔 1 355 m。同一海拔 4 种林分类型土壤容重平均值:人工杉木林 > 针阔混交林 > 人工柳杉林 > 常绿阔叶混交林;土壤总孔隙度和毛管孔隙度的平均值均为:人工柳杉林 > 常绿阔叶混交林 > 人工杉木林 > 针阔混交林;非毛管孔隙度平均值:针阔混交林 > 常绿阔叶混交林 > 人工杉木林 > 人工柳杉林。

(2) 0—60 cm 土层随深度的增加林地土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量均减小;随海拔升高林地土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量平均值均增大。同一海拔 4 种林分类型土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量平均值均为:人工柳杉林 > 常绿阔叶混交林 > 针阔混交林 > 人工杉木林。

(3) 海拔 300~1 355 m 同种林分类型土壤排水能力平均值为:海拔 900 > 海拔 600 > 海拔 1 355 > 海拔 300 m,海拔 900 m 土壤排水能力平均值是海拔 300 m 的 1.82 倍;土壤贮水量平均值随海拔升高逐渐增大,海拔 1 355 mm 土壤贮水量平均值为海拔 300 mm 的 1.57 倍。同一海拔 4 种林分类型土壤排水能力平均值为:常绿阔叶混交林 > 人工杉木林 > 人工柳杉林 > 针阔混交林;土壤贮水量平均值为:人工柳杉林 > 人工杉木林 > 常绿阔叶混交林 > 针阔混交林。

结果表明,研究区内同一林分类型随海拔升高土壤特性和涵养水源功能增强;同一海拔人工柳杉林和常绿阔叶林土壤物理性能较好;人工杉木林和针阔混交林较差。针阔混交林土壤孔隙度、排水能力、贮水量最差,不利于水源涵养和保持水土。人工柳杉林由于形成林分时间较长,枯枝落叶层较厚,土壤孔隙度、持水量、贮水量较大,但排水能力较常绿阔叶林小,在降雨较少的情况下,可以更好地将水分吸收在土壤中,但在降雨量大且集中的南方红壤区,高强度的降雨来不及入渗而形成较大的地表径流,造成冲刷。因此,从较长时间来看,同一海拔常绿阔叶林水源涵养及保持水土能力要高于人工柳杉林。

(下转第 61 页)

喜草 2 种方式的团聚体有机碳含量最高,罗望子十余甘子混交林内的团聚体有机碳最低。罗望子十乡土草本和罗望子十百喜草林内的团聚体有机碳在 20—40 cm 仍高于光板地土壤表层的团聚体有机碳。

罗望子十乡土草本方式的团聚体有机碳高于罗望子十百喜草,但由于试验样方偏少,而干热河谷地区的外引草本植物较多,因此尚不能得出乡土草本与罗望子混交林的固碳效益高于引罗望子与百喜草人工林模式的结论。因此,深化干热河谷区不同生态恢复方式的土壤固碳效益研究将是以后工作的重点。

20—40 cm 处,样地 C 的团聚体有机碳在粒径 10~5 mm 和 5~1 mm 团聚体中出现小幅增加,这一现象在其他样地内没有出现过,这是否暗示着干热河谷地区罗望子十余甘子的复合群落对土壤表层的团聚体有机碳影响不显著,但对提高土壤深层大团聚体有机碳作用明显,导致该现象的原因尚需进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates[J]. *Journal of Soil Science*, 1982(33):141-163.
- [2] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by  $^{13}\text{C}$  natural abundance[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996,60:801-807.
- [3] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter as associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000,51:595-605.
- [4] 罗友进,魏朝富,李渝,等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(1):257-266.
- [5] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004,41(5):687-699.
- [6] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J]. *土壤学报*, 2010,47(1):153-158.
- [7] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及有机碳分布变化[J]. *土壤通报*, 2000,31(5):193-195.
- [8] 陈志杰,廖翠华,黄仕凤. 土地利用变化对土壤团聚体有机碳的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010,38(24):13203-13204.
- [9] 毛艳玲,杨玉盛,邹双全,等. 土地利用变化对亚热带山地红壤团聚体有机碳的影响[J]. *山地学报*, 2007,25(6):706-713.
- [10] 孔雨光,张金池,张东海,等. 土地利用变化对土壤及团聚体结合有机碳的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2009,29(2):39-44.
- [11] 王克勤,沈有信,陈奇伯,等. 金沙江干热河谷人工植被土壤水环境[J]. *应用生态学报*, 2004,15(5):809-813.
- [12] 何毓蓉,徐建忠,黄成敏. 金沙江干热河谷区变性土的特征及系统分类[J]. *土壤学报*, 1995,32(S):102-103.
- [13] 姜志林. 森林生态系统蓄水保土的功能[J]. *生态学杂志*, 1984,6(3):58-63.
- [14] 陈卓梅,郑郁善,黄先华,等. 秃杉混交林水源涵养功能的研究[J]. *福建林学院学报*, 2002,22(3):266-269.
- [15] 张国防. 闽江流域洪灾与森林的水文效应[J]. *福建林业科技*, 2000,27(1):63-65.
- [16] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等. 宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J]. *水土保持学报*, 2007,21(1):95-98.
- [17] 赵世伟,周印东,吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002,16(4):119-122.
- [18] 张光灿,夏江宝,王贵霞,等. 鲁中花岗岩山区人工林土壤水分物理性质[J]. *水土保持学报*, 2005,19(6):44-48.
- [19] 李德生,张萍,张水龙,等. 黄前库区经济林土壤水文效益研究[J]. *水土保持研究*, 2004,11(1):141-143.
- [20] 王燕,王兵,赵广东,等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. *水土保持学报*, 2008,2(1):32-34.
- [21] 李灵,张玉,孔丽娜,等. 武夷山风景区不同林地类型土壤水分物理性质及土壤水库特性[J]. *水土保持通报*, 2011,31(3):15-17.
- [22] 安兴琴,陈玉春. 浅议西北地区生态环境建设的气候效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2002,20(1):116-119.
- [23] 付为国,李萍萍,吴沿友. 镇江内江湿地不同演替阶段植物群落小气候日动态[J]. *应用生态学报*, 2006,17(9):1699-1704.
- [24] 宋键,金秉福,张云吉. 烟台门楼水库氮磷营养盐的分布及其成因分析[J]. *水土保持研究*, 2007,14(3):321-324.
- [25] 李如忠,汪家权,钱家忠. 基于灰色动态模型群法的河流水质预测研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2002,22(4):10-12.
- [26] 张远东,刘世荣,罗传文,等. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征[J]. *生态学报*, 2009,29(2):627-635.

(上接第 57 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 姜志林. 森林生态系统蓄水保土的功能[J]. *生态学杂志*, 1984,6(3):58-63.
- [2] 陈卓梅,郑郁善,黄先华,等. 秃杉混交林水源涵养功能的研究[J]. *福建林学院学报*, 2002,22(3):266-269.
- [3] 张国防. 闽江流域洪灾与森林的水文效应[J]. *福建林业科技*, 2000,27(1):63-65.
- [4] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等. 宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J]. *水土保持学报*, 2007,21(1):95-98.
- [5] 赵世伟,周印东,吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002,16(4):119-122.
- [6] 张光灿,夏江宝,王贵霞,等. 鲁中花岗岩山区人工林土壤水分物理性质[J]. *水土保持学报*, 2005,19(6):44-48.
- [7] 李德生,张萍,张水龙,等. 黄前库区经济林土壤水文效益研究[J]. *水土保持研究*, 2004,11(1):141-143.
- [8] 王燕,王兵,赵广东,等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. *水土保持学报*, 2008,2(1):32-34.
- [9] 李灵,张玉,孔丽娜,等. 武夷山风景区不同林地类型土壤水分物理性质及土壤水库特性[J]. *水土保持通报*, 2011,31(3):15-17.
- [10] 安兴琴,陈玉春. 浅议西北地区生态环境建设的气候效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2002,20(1):116-119.
- [11] 付为国,李萍萍,吴沿友. 镇江内江湿地不同演替阶段植物群落小气候日动态[J]. *应用生态学报*, 2006,17(9):1699-1704.
- [12] 宋键,金秉福,张云吉. 烟台门楼水库氮磷营养盐的分布及其成因分析[J]. *水土保持研究*, 2007,14(3):321-324.
- [13] 李如忠,汪家权,钱家忠. 基于灰色动态模型群法的河流水质预测研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2002,22(4):10-12.
- [14] 张远东,刘世荣,罗传文,等. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征[J]. *生态学报*, 2009,29(2):627-635.