

川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应

朱万泽¹, 盛哲良^{1,2}, 舒树森^{1,2}

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 川西亚高山原始针叶林遭受大规模采伐后自然恢复形成的次生林已成为该区域的主要森林类型之一,也是我国西南林区水源涵养林的重要组成部分。现有亚高山森林水源涵养功能研究主要集中在暗针叶林,对天然次生林关注较少。选择川西米亚罗林区亚高山次生林自然恢复演替序列上高山柳灌丛、次生桦木阔叶林、岷江冷杉桦木针阔混交林,以相邻岷江冷杉成熟林为对照,采用空间代替时间的方法,基于土壤容重、孔隙度、持水性能等测定,分析了次生林恢复过程中土壤物理性质变化及土壤水源涵养效应动态,结果表明:(1)次生林恢复过程中,土壤容重总体呈下降趋势,除灌丛与阔叶林、针阔混交林、暗针叶林间具有显著差异外,其余植被类型间无显著差异,随着土层的加深,土壤容重呈增加趋势;(2)不同恢复阶段土壤孔隙度具有显著差异,以针阔混交林0—30 cm 土层总孔隙度(64.39%)和毛管孔隙度(50.49%)为最高,灌丛总孔隙度(41.25%)和毛管孔隙度(33.70%)为最低;而土壤非毛管孔隙度以暗针叶林(14.27%)为最高;随着土层的加深,土壤孔隙度大致呈现出递减的趋势;(3)随着林龄增加,次生林土壤0—30 cm 土层最大持水量呈波动性增加趋势,在针阔叶混交林阶段达到最大(1 815.02 t/hm²),到暗针叶林阶段有所下降(1 659.88 t/hm²);土壤毛管持水量以针阔混交林(1 369.72 t/hm²)为最高,而非毛管持水量以暗针叶林(534.95 t/hm²)为最高,暗示针阔混交林树木生长所需有效水贮存量较大,亚高山暗针叶林具有较强的土壤水分调节能力和土壤渗透能力。从水源涵养功能角度,川西亚高山森林植被恢复应注重构建针阔叶混交林结构。

关键词: 土壤容重; 孔隙度; 持水能力; 天然次生林; 川西亚高山

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0205-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.029

Soil Physical Properties and Water Holding Capacity of Natural Secondary Forests in a Sub-alpine Region of Western Sichuan, China

ZHU Wanze¹, SHENG Zheliang^{1,2}, SHU Shumiao^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

Abstract: The secondary forest formed by natural restoration after the large-scale logging of primary conifer forests has become one of the dominant forest types in a subalpine region of western Sichuan, and plays an important role in water conservation in the forests of southwestern China. However, less attention was paid to the water conservation function of subalpine natural secondary forest. Therefore, by using the method of replacing space with time, four typical vegetation types of shrub (dominated by *Salix cupularis*), broad-leaved forest (dominated by *Betula spp.*), mixed coniferous and broad-leaved forest (dominated by *Abies faxoniana* and *Betula spp.*), and old-growth conifer forest (dominated by *A. faxoniana*) along natural restoration with different stand ages in Miyalu of western Sichuan were selected to measure soil bulk density, porosity and water holding capacity. The aim of this study was to quantify the changes of soil physical properties and water-holding capacity. The results indicated as follows: (1) The soil bulk density decreased with the vegetation restoration and increased with the depth, and the trend was subalpine conifer mature forest < mixed coniferous and broad-leaved forest < broad-leaved forest < shrub. (2) There were significant differences in soil porosity along natural restoration. The mixed coniferous and broad-leaved forest had the maximum total porosity (64.39%) and capillary porosity (50.49%) in the 0—30 cm soil layer, and

收稿日期:2019-06-11

资助项目:四川省环境治理与生态保护重大科技专项(2018SZDZX0031);国家重点研发计划项目(2017YFC0505004);中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所“一三五”方向性项目(SDS-135-1707)

第一作者:朱万泽(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事森林生态研究。E-mail:wzzhu@imde.ac.cn

shrub had the minimum total porosity (41.25%) and capillary porosity (33.70%). However, the soil non-capillary porosity was the highest in conifer forest (14.27%), and the soil porosity showed a decreasing trend with the soil depth. (3) The soil maximum water-holding capacity along the natural restoration varied nonlinearly with the increasing stand age, from 1 172.07 t/hm² for the shrub stage to 1 815.02 t/hm² for the mixed coniferous and broad-leaved forest, and to 1 659.88 t/hm² for the conifer forest. The mixed conifer and broad-leaved forest has the maximum soil capillary water holding capacity (1 369.72 t/hm²), while conifer forest has the maximum non-capillary water holding capacity (534.95 t/hm²), which indicated that the former needs more available water storage capacity for vegetation growth, and the latter has strong soil water regulation ability and permeability ability. It is concluded from this study that attention should be paid to the construction of conifer and broad-leaf mixed forest structure in the alpine forest restoration in western Sichuan for the improvement of water conservation function.

Keywords: soil bulk density; soil porosity; water holding capacity; natural secondary forest; sub-alpine region of western Sichuan

作为森林生态系统的重要组成部分,森林土壤在水土保持和水源涵养等功能中发挥着巨大的作用,是森林生态系统水源涵养的主体^[1]。在森林生态系统不同界面间的水分传输中,土壤层对降水资源分配格局影响最为明显,土壤层截水量可占到森林生态系统同期截水量的 50%以上^[2]。土壤物理特性反映了土壤的结构状况、养分状况、持水性能、保水能力及渗透能力,是评价森林水土保持功能和水源涵养效应的重要指标,直接关系到森林植被生长及其对水分、养分的吸收和利用,影响着土壤水分贮存量 and 贮存方式^[3]。森林土壤对降水的分配、储存、转化是一个极其复杂的过程。土壤物理性质是气候、植被、地形、地质等自然条件综合作用的结果,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,不同植被恢复演替阶段、不同植被类型土壤层持水保水能力存在较大差异,即使在相同植被类型下,因土壤母质、林龄、林分结构等的差异也有明显的不同。

川西地区是长江、黄河上游水源涵养和生物多样性保护重点区域,以云、冷杉等为主构成的川西亚高山针叶林是西南林区的主体,主要分布在岷江、金沙江、雅砻江等上游山地,是长江上游水源涵养的重要组成部分^[4]。然而,在 20 世纪下半叶,川西亚高山原始森林遭受大规模的采伐利用,加之森林火灾、森林病虫害、过度放牧等人为干扰的影响,生态系统的结构和功能遭受严重的破坏。直至 1998 年,天然林资源保护工程正式启动,川西亚高山森林全面禁伐封育。川西亚高山针叶林采伐迹地主要有自然恢复、人工恢复、人工促进自然恢复等恢复模式,其中自然恢复是川西亚高山采伐迹地上的主要恢复途径,通过自然恢复形成的不同恢复系列的次生林已成为该区域的主要森林类型之一^[4-5],是我国西南林区水源涵养林的重要组成部分。现有该区域森林植被水源涵养功能研究主要涉及林冠层截

留^[6-11]、枯落物层水文特征^[12-15]、土壤结构与水文效应^[16-20]等,且研究森林类型主要集中在暗针叶林,而对川西亚高山天然次生林恢复演替序列上林地水源涵养效应的研究鲜有报道^[18-19]。川西亚高山是全国生态功能区划中水源涵养与生物多样性保护的重要区域,开展亚高山自然恢复过程中土壤水源涵养效应研究,有助于评估和预测该区域天然次生林生态系统恢复效果与生态功能状况。

川西亚高山暗针叶林采伐迹地通常经草本、灌丛、次生阔叶林、针阔混交林阶段,向暗针叶林阶段自然恢复,植被自然恢复演替的一般过程是:1~3 年为草本阶段,3~20 年为灌木阶段,20~60(70)年为阔叶林阶段,到 60(70)年进入针阔混交林阶段,不同区域、不同海拔植被恢复阶段年限可能有所不同,以桦木为主的次生阔叶林和云冷杉—桦木针阔混交林是川西亚高山的主要次生林类型^[21]。植被恢复通过凋落物分解,增加土壤有机质和营养元素含量,改善土壤结构和土壤水分入渗等物理性质,提高林地水源涵养功能^[22-23]。本文以川西米亚罗亚高山林区次生林自然恢复演替序列上高山柳灌丛、次生桦木阔叶林、岷江冷杉桦木针阔混交林、岷江冷杉成熟林为对象,采用空间代替时间的方法,基于土壤容重、孔隙度、持水性能等测定,分析了次生林恢复过程中土壤物理性质变化及土壤水源涵养效应动态,研究可为川西亚高山森林水源涵养功能评估,为退化森林生态系统水源涵养功能提升,以及亚高山次生林生态系统管理与调控提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于川西阿坝州理县米亚罗林区(31°24'—31°55'N,102°35'—103°04'E),海拔 2 200~5 500 m,地处青藏高原东南缘向四川盆地过渡的高山峡谷地

带,位于岷江上游一级支流杂古脑河的上游;属于季风性山地气候,夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,以海拔2 760 m的米亚罗镇为例,年平均气温6.2℃,1月平均气温-8℃,7月平均气温12.6℃,≥10℃年积温为1 200~1 400℃,年无霜期约200 d,年均降水量为600~1 100 mm,年蒸发量为1 000~1 900 mm。主要森林土壤类型为山地暗棕壤,成土母质主要为千枚岩、板岩和白云岩等残积风化物,土层薄,石砾含量高。林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而分异^[19]。原生森林分布于海拔2 400~4 200 m,以亚高山暗针叶林为主,主要优势树种为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)。自20世纪下半叶的大规模人工砍伐后,采伐迹地上形成了“灌丛—一次生桦木阔叶林—桦木冷云杉针阔混交林—岷江冷杉林”自然恢复演替序列,加之人工造林更新,整个亚高山森林景观发生了巨大的变化,外貌上原始暗针叶林变为落叶阔叶林、针阔混交林、中幼龄针叶林和残留的老龄针叶林镶嵌分布的格局,原始暗针叶林主要保留于海拔

3 600 m以上;人工更新的中幼龄针叶林主要分布于海拔2 800~3 600 m的阳坡、半阳坡;而落叶阔叶林和针阔混交林则主要分布于海拔2 800~3 600 m的阴坡、半阴坡,米亚罗森林恢复过程中各种森林植被类型镶嵌分布,景观破碎化严重^[24]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集

采用空间代替时间的方法,选择米亚罗林区亚高山区域砍伐后20年、30年、40年、50年、70年、80年、90年等不同恢复林龄的灌丛、阔叶林、针阔混交林等天然次生林设置野外观测样地,乔木样地为20 m×20 m,灌丛样地为10 m×10 m,样地之间间隔至少200 m,每个林龄3个重复,以该区域岷江冷杉原始林为对照,林龄根据当地森工局的采伐历史,并结合生长锥钻取树芯进行确定,样地主要基本特征见表1。2018年9—10月进行土壤样品的采集,每个样地挖掘3个土壤剖面,用环刀法采集0—10,10—20,20—30 cm土壤样品,带回实验室内测定土壤孔隙和水分等物理性质。

表1 川西亚高山米亚罗林区不同恢复阶段次生林样地基本情况

恢复阶段	林龄/ a	优势树种	海拔/ m	坡向	坡位	坡度/ (°)	郁闭度	平均 树高/m	平均 胸径/cm
灌丛	20	高山柳	3500	NW	上坡	10	0.80	1.5	—
	30	红桦、槭树	2650	NE	中坡	30	0.75	9.3	13.5
阔叶林	40	红桦、槭树	2820	NE	中坡	35	0.85	11.5	15.1
	50	红桦、槭树	2700	S	中坡	20	0.75	12.6	16.8
	60	红桦、槭树	2600	NW	中坡	38	0.85	13.2	17.5
针阔混交林	70	红桦、槭树、岷江冷杉	3280	S	中坡	25	0.85	18.8	21.3
	80	红桦、槭树、岷江冷杉	3100	NW	中坡	20	0.90	16.5	19.7
暗针叶林	90	红桦、槭树、岷江冷杉	2850	SW	中坡	25	0.90	22.3	22.5
	150	岷江冷杉	3300	SW	上坡	25	0.75	25.5	27.6

1.2.2 土壤物理性质和持水性能测定

土壤容重采用环刀法(环刀体积为100 cm³)测定;土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度采用环刀法和浸水法测定;各物理性质测定与土壤最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量等计算参照《土壤理化分析》^[25]和《森林土壤分析方法》^[26]。

1.3 数据处理

采用单因素方差(One-way ANOVA)分析次生林不同恢复阶段土壤容重、孔隙度、持水性能的变化,并进行Duncan多重差异性检验,土壤持水特性指标与土壤物理性质指标的相关分析采用Person相关分析法。图表制作采用Excel 2010和SPSS 17.0统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 次生林恢复过程中土壤物理性质变化

2.1.1 土壤容重的变化

从图1可以看出,次生林自然恢复过程中,土壤容重总体呈下降趋势,灌丛、阔

叶林、针阔混交林、暗针叶林土壤容重(0—30 cm)总值分别为1.190 7,0.857 0,0.841 7,0.834 3 g/cm³。4个植被恢复阶段除灌丛土壤容重与阔叶林、针阔混交林、暗针叶林3个植被类型间存在显著差异($p < 0.01$)外,其余植被类型间均无显著差异($p > 0.05$)。从不同恢复阶段土壤容重的变异系数来看,阔叶林(16.31%) > 针阔混交林(15.46%) > 暗针叶林(13.90%) > 灌丛(9.04%)。不同土层容重变异系数大小为0—10 cm土壤(17.49%) > 10—20 cm土壤(14.12%) > 20—30 cm土壤(13.23%),且不同恢复阶段有所不同。从剖面的深度上看,随着土层的加深,土壤容重呈增加趋势,除恢复到80年的针阔混交林土壤外,其余林龄植被不同土层之间土壤容重均有显著差异($p < 0.05$)。

2.1.2 土壤孔隙度的变化

土壤孔隙度在一定程度上反映了土壤的物理性质和涵养水源的能力,直接影响土壤通气透水性 and 根系穿插的难易程度,对土壤水、肥、气、热和微生物活性等发挥着重要的调节作

用。土壤孔隙度可分为毛管孔隙度和非毛管孔隙度,毛管孔隙度蓄存的水分供树木根系吸收或土壤蒸散,非毛管孔隙度不仅为饱和土壤水分提供通道,还为水分蓄存提供了空间。从图 2 可以看出,次生林不同恢复阶段土壤总孔隙度具有显著差异($p < 0.05$),灌丛、阔叶林、针阔混交林、暗针叶林土壤总孔隙度(0—30 cm)总均值分别为 42.73%, 48.23%, 65.25%, 62.15%, 以针阔混交林土壤总孔隙度为最高,灌丛为最低,随着土层的加深土壤总孔隙度大致呈现出递减的趋势,灌丛和暗针叶林不同土层间总孔隙度具有显著差异;在阔叶林阶段,表土层(0—10 cm)总孔隙度与其余两层土壤大多差异显著;在针阔叶混交林阶段,3 个林龄植被土壤不同深度总孔隙度均具有显著差异。总孔隙度对土壤的蓄水能力有着重要的影响,表明针阔叶混交林土壤的蓄水能力最强。

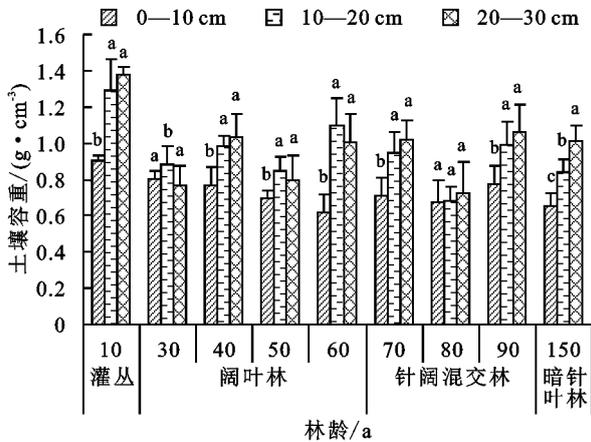


图 1 川西亚高山次生林恢复过程中土壤容重变化

土壤毛管孔隙度在 0—30 cm 土层平均值的大小排序、随土层深度变化趋势与总孔隙度表现一致。灌丛、阔叶林、针阔混交林、暗针叶林土壤毛管孔隙度(0—30 cm)总均值分别为 33.70%, 34.58%, 50.49%, 44.31%。有所不同的是,在 80 林龄针阔叶混交林,0—10 cm 土壤毛管孔隙度与其余 2 层有显著差异($p < 0.05$),而 10—20, 20—30 cm 土层无显著差异;在 90 林龄针阔叶混交林,20—30 cm 土层毛管孔隙度与其余 2 层有显著差异($p < 0.05$),而 0—10, 10—20 cm 土层间无显著差异(图 2)。土壤毛管孔隙度大小关系到土壤中可用于林木正常蒸腾耗水和生长消耗水分的多少,即土壤中有效水的贮存量与林木耗水量呈正比关系,说明针阔叶混交林林地树木生长所需有效水贮存量较大。

土壤非毛管孔隙度由微孔隙和空气孔隙组成。不同恢复阶段土壤非毛管孔隙度变化趋势与毛管孔隙度和总孔隙度有所不同,总平均值大小顺序为暗针叶林(17.83%)>针阔叶混交林(14.75%)>阔叶林(13.65%)>灌丛(9.03%),阔叶林、针叶林混交林土

壤非毛管孔隙度之间无显著差异,而暗针叶林土壤非毛管孔隙度与其余 3 个植被恢复阶段具有显著差异($p < 0.05$)。随着土层的加深,土壤非毛管孔隙度大多呈递减的趋势,4 种植被类型 0—10 cm 土壤非毛管孔隙度大多与其余 2 层差异显著(图 2)。

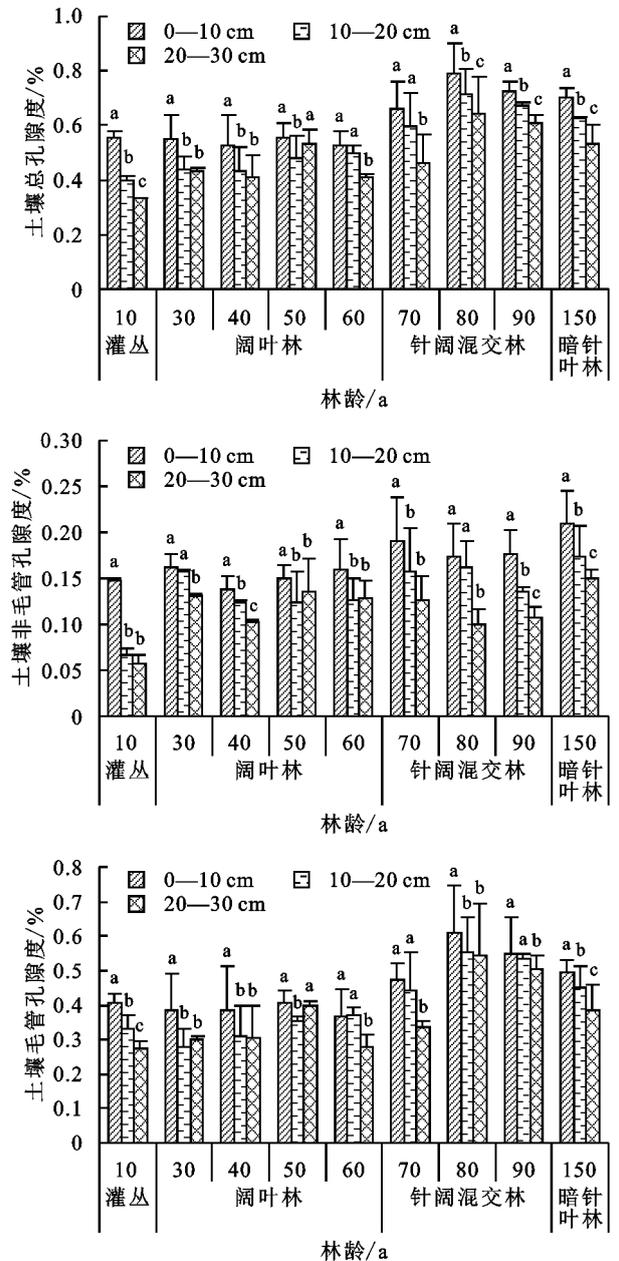


图 2 川西亚高山次生林恢复过程中土壤孔隙度变化

2.2 次生林恢复过程中土壤持水性能

总体来讲,随着川西亚高山砍伐迹地植被的恢复,0—30 cm 土层最大持水量呈幂函数显著增加趋势($y = 1191.7x^{0.1896}$, $R^2 = 0.7413$, $p < 0.05$),在针阔叶混交林阶段最大持水量达到最大(1 815.02 t/hm²),到暗针叶林阶段有所下降(1 659.88 t/hm²)(图 3)。不同恢复阶段土壤各层的最大持水量随土层深度的变化有所差异,灌丛阶段为:0—10 cm 土层>20—30 cm 土层>10—20 cm 土层,其余 3 个阶段均为:0—10 cm 土层>10—20 cm 土层>20—30 cm 土

层。在阔叶林阶段不同林龄 0—10 cm 土层之间最大持水量无显著差异 ($p > 0.05$), 而其余 2 层除 30, 40 年林龄 10—20 cm 土层外, 均具有显著差异 ($p < 0.05$); 而在针阔叶混交林阶段, 除 70, 90 年林龄 10—20 cm 土层最大持水量无显著差异外, 其余土层不同林龄间均具有显著差异。从不同恢复阶段 0—30 cm 土层最大持水量变异系数来看, 依次为针阔混交林 (13.78%) > 阔叶林 (12.44%) > 暗针叶林 (10.15%) > 灌丛 (7.89%), 且不同恢复阶段 20—30 cm 土层最大持水量均具有较大的变异系数。

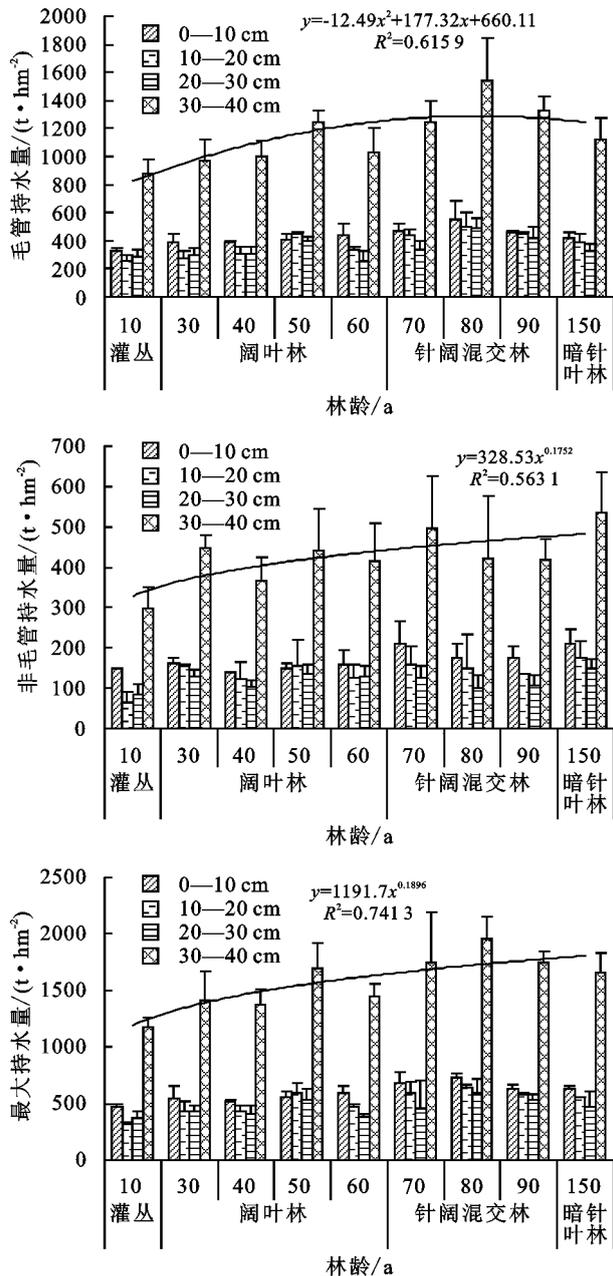


图 3 川西亚高山次生林恢复过程中土壤持水量变化

从图 3 可以看出, 随着次生林的恢复, 0—30 cm 土层毛管持水量呈非线性增加趋势 ($y = -12.49x^2 + 177.32x + 660.11, R^2 = 0.6159, p < 0.05$), 不同恢复阶段土壤毛管持水量与土壤最大持水量变化趋势相似, 仍为针阔混交林 ($1369.72 t/hm^2$) > 暗针叶林

($1124.93 t/hm^2$) > 阔叶林 ($1063.48 t/hm^2$) > 灌丛 ($872.83 t/hm^2$), 且均 0—10 cm 土层毛管持水量为最大, 除灌丛为 0—10 cm 土层 > 20—30 cm 土层 > 10—20 cm 土层外, 其余林龄毛管持水量均为 0—10 cm 土层 > 10—20 cm 土层 > 20—30 cm 土层。从不同恢复阶段 0—30 cm 土层毛管持水量变异系数来看, 暗针叶林 (13.52%) > 针阔混交林 (13.34%) > 阔叶林 (12.47%) > 灌丛 (12.15%), 同样地, 不同恢复阶段仍以 20—30 cm 土层毛管持水量变异系数为最大。

从非毛管持水量变化来看, 不同恢复阶段土壤 (0—30 cm) 呈幂函数增加趋势 ($y = 328.53x^{0.1752}, R^2 = 0.5631, p < 0.05$), 大小顺序为: 暗针叶林 ($534.95 t/hm^2$) > 针阔混交林 ($445.30 t/hm^2$) > 阔叶林 ($417.33 t/hm^2$) > 灌丛 ($299.24 t/hm^2$)。不同恢复阶段土壤各层的非毛管持水量随深度的变化有所差异, 灌丛和 60 林龄阔叶林为: 0—10 cm 土层 > 20—30 cm 土层 > 10—20 cm 土层, 其余林龄均为: 0—10 cm 土层 > 10—20 cm 土层 > 20—30 cm 土层。从不同恢复阶段 0—30 cm 土层非毛管持水量变异系数来看, 依次为针阔混交林 (25.06%) > 针叶林 (18.52%) > 灌丛 (17.43%) > 阔叶林 (17.28%), 不同恢复阶段各土层非毛管持水量变异系数均以 10—20 cm 土层为最大 (图 3)。

2.3 次生林恢复过程中土壤持水量与土壤容重、土壤孔隙度的相关性分析

由相关分析结果 (表 2) 表明, 川西亚高山次生林恢复过程中土壤最大持水量与土壤容重呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 与土壤毛管孔隙度和总孔隙度的相关关系达到极显著水平 ($p < 0.01$), 与非毛管孔隙度达到显著相关水平 ($p < 0.05$); 毛管持水量与土壤容重和非毛管孔隙度呈负相关, 而与毛管孔隙度和总孔隙度呈极显著相关 ($p < 0.01$)。不同恢复阶段土壤持水量与土壤容重和孔隙度的相关关系有所不同, 基本一致的现象是, 不同恢复阶段土壤持水量与土壤容重呈负相关关系, 毛管持水量与毛管孔隙度、非毛管持水量与非毛管孔隙度均呈显著正相关, 最大持水量大多与毛管孔隙度和总孔隙度达到显著相关水平。

3 讨论

3.1 次生林恢复过程中土壤容重和孔隙度变化

土壤容重和孔隙度等是土壤物理性质的基本指标, 能较好地反映森林土壤结构状况、土壤通水透气性能以及持水能力。川西亚高山砍伐迹地通过近 90 年的自然恢复, 土壤物理性质发生明显变化, 次生林 (阔叶林和针阔混交林) 各土层平均容重变化范围在 $0.62 \sim 1.10 g/cm^3$, 平均为 $0.85 g/cm^3$, 与祁凯斌等^[19]同区域自然恢复次生林的测定结果相似, 但高

于九寨沟自然保护区次生桦木—槭树林^[27]。原始暗针叶林土壤容重变化范围为 0.57~1.03 g/cm³, 平均为 0.83 g/cm³, 与霍小鹏等^[28]该区域暗针叶林变化范围 0.65~1.07 g/cm³, 平均值 0.88 g/cm³ 的测定结果相似, 但同样略高于九寨沟自然保护区和黄龙自然保护区原始暗针叶林^[27]、西藏色季拉山相似海拔 (3 400 m) 原始暗针叶林^[29], 以及卧龙自然保护区岷江冷杉原始林^[30], 可能与后几者较早得到保护, 人为干扰较少有关。次生林恢复过程中土壤容重随着林

龄的增加而降低, 随土层深度的增加而增大, 以暗针叶林为最低, 灌丛为最高, 阔叶林和针阔混交林居中, 可能与砍伐迹地上原有植被 (暗针叶林) 及其本身土壤发育较为良好有关。川西亚高山次生林恢复过程中, 土壤容重大都随土壤深度的增加而增大, 与中国陆地生态系统的土壤容重变化规律相一致^[31]。30 年、50 年、60 年阔叶林 10—20 cm 土层容重大于 20—30 cm 土层, 可能与这几个林龄阔叶林土壤受到一定程度的人为扰动有关。

表 2 川西亚高山次生林恢复过程中土壤持水量与土壤容重、孔隙度的相关系数

恢复阶段	土壤持水量	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度
灌丛	毛管持水量	-0.474	0.931**	0.437	0.752
	非毛管持水量	-0.876*	0.698	0.878*	0.887*
	最大持水量	-0.715	0.891*	0.795*	0.882*
阔叶林	毛管持水量	-0.644*	0.838**	-0.181	0.820**
	非毛管持水量	-0.687*	0.375	0.872**	0.086
	最大持水量	-0.708*	0.797**	0.234	0.834**
针阔混交林	毛管持水量	-0.339	0.889**	-0.397	0.776**
	非毛管持水量	-0.622**	-0.397	0.973**	0.271
	最大持水量	-0.783**	0.723*	0.271	0.885**
暗针叶林	毛管持水量	-0.223	0.923**	-0.160	0.716
	非毛管持水量	-0.704	-0.160	0.912**	0.463
	最大持水量	-0.677	0.825*	0.863*	0.912**
总体	毛管持水量	-0.260	0.876**	-0.261	0.830**
	非毛管持水量	-0.653**	-0.304*	0.532**	0.258
	最大持水量	-0.365**	0.834**	0.291*	0.884**

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平达显著差异; * 表示在 $p < 0.05$ 水平上达显著差异。

本研究表明, 川西亚高山 30~90 年生次生林总孔隙度变化幅度为 40.91%~78.66%, 平均值为 55.52%, 与祁凯斌等^[19]测定结果相似, 低于九寨沟自然保护区次生桦木—槭树林^[27]; 原始暗针叶林土壤总孔隙度变化范围为 50.25%~75.68%, 平均为 62.15%, 与霍小鹏等^[28]测定结果相似, 同样略低于九寨沟自然保护区和黄龙自然保护区原始暗针叶林^[25], 以及西藏色季拉山相似海拔 (3 400 m) 原始暗针叶林^[29]。随着林龄的增加, 土壤总孔隙度增加, 同时随着土层的增加土壤总孔隙度降低, 可能与上层土壤根系分布较多有关。一般认为, 土壤中大小孔隙同时存在, 大部分森林土壤总孔隙度在 40%~60% 范围内, 但土壤总孔隙度在 50% 左右, 其中非毛管孔隙占 20%~40% 时, 土壤通气性、透水性和持水能力比较协调^[32], 暗示除灌丛阶段外, 其余 3 个植被恢复阶段土壤均具有较好的通气和持水能力 (图 2)。非毛管孔隙数量直接影响林地的蓄水能力和水分调节功能的强弱, 本研究中, 以顶级群落亚高山暗针叶林土壤 3 个土层的非毛管孔隙度均为最高, 说明暗针叶林土壤的雨水下渗能力较强, 有利于减少地表径流, 增强土壤的抗冲刷和抗侵蚀能力。次生林恢复过程中, 针阔混交林和阔叶

林土壤总孔隙度具有较大的变异系数, 表明土壤总孔隙度不仅受植被恢复阶段的影响, 而且与林龄相关。土壤的土壤孔隙度受土壤发育状况的影响, 土壤表层的凋落物组成、地下根系的生长发育状况和凋落物的分解状况等存在差异, 也会造成土壤孔隙度的差异。

次生林恢复过程中, 60~80 年中龄林具有较低的土壤容重和较高的土壤总孔隙度, 郭建荣等^[33]对宝天曼自然保护区锐齿栎林的研究也表明, 中龄林较成熟林具有较低的土壤容重、较高的土壤孔隙度和土壤持水能力。中龄林良好的林+灌+草结构, 以及相对较厚的地表枯落物覆盖, 有利于对降水的截留及分配, 减少对地表的冲击, 改善土壤物理性质, 有力佐证了不同植被发育阶段土壤具有不同的结构特点, 植被类型和结构差异是影响林地土壤物理特性的重要因素。

3.2 次生林恢复过程中土壤持水量变化

土壤持水性能与土壤结构密切相关, 能较好地反映林地土壤的保水、供水能力。土壤贮水能力是植被调节水分和涵养水源的重要指标, 其能力决定于土壤物理性质和水分特征。土壤水分特征除了受区域气候特征等外界条件影响外, 植被类型也是一个重要的影响因素^[34-35]。植被类型通过影响林下微生境、凋落

物回归、有机质含量和根系分布及数量等影响土壤结构^[19,36]。本研究表明,川西亚高山次生林自然恢复过程中,不同植被阶段土壤最大持水量差异显著,30~90年次生林0—30 cm土壤最大持水量为1 368.65~1 960.73 t/hm²,其中0—10 cm土层为525.12~725.39 t/hm²,10—20 cm土层为433.75~645.37 t/hm²,20—30 cm土层为385.68~589.97 t/hm²(图3),与祁凯斌等^[19]同区域自然恢复同龄次生林的测定结果相似。随着林龄的增加,次生林土壤最大持水量呈波动性增加趋势(图3),以70~90年针阔叶混交林阶段为最大。有研究^[36-38]表明,不同植物类型下的土壤物理性质差异明显,在改良土壤物理性状方面,混交林最好,草本次之,纯林最差;多树种混交能提高土壤毛管和非毛管孔隙度,改善土壤物理性质,提高土壤蓄水能力^[39-40]。与桦木次生林和岷江冷杉林相比,川西亚高山针阔混交林凋落物多,具有较高的土壤碳贮量^[41],有机质丰富,微生物活动旺盛,对林地土壤的改良作用好,从而使土壤团粒结构增加,孔隙增多,有利于水分的传输和储存。本研究中,针阔混交林土壤具有较低的土壤容重,以及较高的土壤毛管和非毛管孔隙度(图1、图2)。因此,从水源涵养角度出发,川西亚高山次生林恢复过程中,应注重调整阔叶与针叶林树种结构,构建针阔混交、复层、异龄林结构,以提升次生林的水源涵养功能。

从次生林自然恢复过程中土壤最大持水量各组分占比来看,以针阔混交林土壤毛管持水量占比为最高(75.34%),暗针叶林为最低(67.77%);而非毛管持水量占比以暗针叶林为最高(32.23%),针阔混交林为最低(24.66%)(图3)。土壤毛管持水量与土壤毛管孔隙度、土壤非毛管持水量与土壤非毛管孔隙度显著相关(表2)。土壤毛管孔隙度大小关系到土壤中可用于林木正常蒸腾耗水和生长消耗水分的多少,即土壤中有效水的贮存量与林木耗水量呈正比关系,表明针阔混交林树木生长所需有效水贮存量较大。非毛管孔隙是土壤重力水分运动的重要途径,主要对水分的调节和土壤的渗透能力产生影响,具体表现为森林植被对水分滞留以及涵养水源、削减洪水能力的发挥。非毛管孔隙度关系到大孔隙的多少,是水分入渗的主要孔隙,有利于降水下渗、固持土壤,减小径流,提高水源涵养功能^[42-43],因此,从非毛管孔隙度来看,川西亚高山暗针叶林顶级群落具有较强的水源涵养能力。冷杉是最为节水的树种之一^[44],张远东等^[24]分析表明,暗针叶林采伐后,不同恢复阶段植被年蒸散量由小至大为老龄暗针叶林、灌丛、针阔混交林、阔叶林,年产水量则正好相反。在川西亚高山米亚罗林区,次生桦木阔叶林和桦木冷杉针阔混交林尚

处于该区森林植被演替的前、中期阶段^[45],桦木属先锋群落树种,从演替初期发展到顶级群落的老龄暗针叶林将需要百年以上的漫长时间,因此,次生林恢复演替过程引起的产水率下降也将持续相对长的时间,进一步证实了次生林恢复较强的水源涵养功能。

森林植被土壤物理特性研究最大的困难在于影响因子随时间变化较明显,本文仅对研究区域土壤容重、孔隙度进行了一次性的取样分析。研究土壤物理性质变化有助于理解植被恢复的生态效应,要全面了解川西亚高山土壤物理特性的变化规律,需要对该地区次生林演替系列群落土壤进行长期定位观测研究,并结合当地典型森林植被类型进行综合分析,以了解次生林恢复过程中土壤的动态变化,揭示川西亚高山次生林恢复演替系列土壤物理性质差异对森林涵养水源功能的影响过程与机制。

参考文献:

- [1] 张彪,李文华,谢高地,等.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J].生态学杂志,2009,28(3):529-534.
- [2] 鲍文,包维楷,何丙辉,等.岷江上游23年生油松纯林下调落物与土壤截留降水的效应[J].水土保持学报,2004,18(5):115-119.
- [3] 刘世荣,温光远,王兵,等.中国森林生态系统水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [4] 杨玉坡,李承彪.四川森林[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [5] 周德彰,杨玉坡.四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究[J].林业科学,1980(2):154-156.
- [6] 谢春华,关文彬,吴建安,等.贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究[J].北京林业大学学报,2002,24(4):68-71.
- [7] 李崇巍,刘世荣,孙鹏森,等.岷江上游植被冠层降水截留的空间模拟[J].植物生态学报,2005,29(1):60-67.
- [8] 吕瑜良,刘世荣,孙鹏森,等.川西亚高山不同暗针叶林群落类型的冠层降水截留特征[J].应用生态学报,2007,18(11):2398-2405.
- [9] 孙向阳,王根绪,吴勇,等.川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J].生态学报,2013,33(2):501-508.
- [10] 薛建辉,郝奇林,吴永波,等.3种亚高山森林群落林冠截留量及穿透雨量与降雨量的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(3):9-13.
- [11] 殷晖,关文彬,薛肖肖,等.贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量再分配的影响研究[J].北京林业大学学报,2010,32(20):1-5.
- [12] 薛建辉,郝奇林,何常清,等.岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J].水土保持学报,2009,23(3):168-172.
- [13] 季冬,关文彬,谢春华.贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究[J].中国水土保持科学,2007,5(2):86-90.

- [14] 陈礼清,孙泽平,李德文,等.川西亚高山植被恢复过程中的土壤和地被物水源涵养能力评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(7):1048-1052.
- [15] 刘洋,张健,杨万勤,等.自然恢复过程中川西亚高山林草交错带地被物储量及持水性能研究[J].水土保持学报,2009,23(3):173-178.
- [16] 庞学勇,刘世全,刘庆,等.川西亚高山针叶林植物群落演替对土壤性质的影响[J].水土保持学报,2003,17(4):42-46.
- [17] 高甲荣,尹婧,牛健植,等.长江上游亚高山暗针叶林林地水文作用初探[J].北京林业大学学报,2002,24(4):76-80.
- [18] 冯秋红,刘兴良,卢昌泰,等.不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响[J].生态学报,2016,36(17):5432-5439.
- [19] 祁凯斌,黄俊胜,杨婷惠,等.亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响[J].生态学报,2018,38(22):8118-8128.
- [20] 张保华,何毓蓉,周红艺,等.长江上游典型区亚高山不同林型土壤的结构性与水分效应[J].水土保持学报,2002,16(4):127-129.
- [21] 马姜明,刘世荣,史作民,等.川西亚高山暗针叶林恢复过程中不同恢复阶段的定量分析[J].应用生态学报,2007,18(8):1695-1701.
- [22] Zhang Z H, Li X Y, Jiang Z Y, et al. Changes in some soil properties induced by re-conversion of cropland into grassland in the semiarid steppe zone of Inner Mongolia, China[J].Plant and Soil,2013,373:89-106.
- [23] Zhao Z N, Wei X R, Wang X, et al. Concentration and mineralization of organic carbon in forest soils along a climatic gradient[J].Forest Ecology and Management, 2019,432:246-255.
- [24] 张远东,刘世荣,顾峰雪.西南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响[J].生态学报,2011,31(24):7601-7608.
- [25] 中国利学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978.
- [26] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [27] 庞学勇,包维楷,江元明,等.九寨沟和黄龙自然保护区原始林与次生林土壤物理性质比较[J].应用与环境生物学报,2009,15(6):768-773.
- [28] 霍小鹏,李贤伟,张健,等.川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究[J].水土保持研究,2009,16(3):192-195.
- [29] 万丹,梁博,聂晓刚,等.西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性[J].生态学报,2018,38(3):1065-1074.
- [30] 何方永,何飞,吴宗达,等.岷江冷杉原始林土壤物理性质的海拔梯度变化[J].西北师范大学学报(自然科学版),2015,51(5):92-98.
- [31] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J].生态学报,2016,36(13):3903-3910.
- [32] 田大伦,陈书军.樟树人工林土壤水文-物理性质特征分析[J].中南林学院学报,2005,25(2):1-6.
- [33] 郭建荣,庄静静,朱学灵,等.不同林龄对宝天曼自然保护区锐齿栎林土壤物理性质及其水源涵养功能差异性影响[J].河南农业大学学报,2012,46(5):549-553.
- [34] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J].生态学报,2016,36(11):3338-3349.
- [35] 徐明,张健,刘国彬,等.植被类型和降雨量对沟谷地土壤水分和温度空间分布的影响[J].草地学报,2017,25(3):499-507.
- [36] Shang W, Zhao L, Wu X D, et al. Soil organic matter fractions under different vegetation types in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Highway, north of Kunlun Mountains, China[J].Journal of Mountain Science,2015,12(4):1010-1024.
- [37] 李裕元,邵明安,陈洪松,等.水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J].生态学报,2010,30(16):4306-4316.
- [38] 曹国栋,陈接华,夏军,等.玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J].生态学报,2013,33(1):195-204.
- [39] Rivero R G, Grunwald S, Osborne T Z, et al. Characterization of the spatial distribution of soil properties in water conservation area2A, everglades, florida[J].Soil Science,2007,172(2):149-166.
- [40] Wösten J H M, Van Genuchten M T. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic function[J].Soil science Society of America Journal,1987,52(6):1762-1770.
- [41] 鲜骏仁,张远彬,王开运,等.川西亚高山 5 种森林生态系统的碳格局[J].植物生态学报,2009,33(2):283-290.
- [42] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(2):196-202.
- [43] 田超,杨新兵,李军,等.冀北山地阴坡枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2011,25(2):97-103.
- [44] 周晓峰,赵惠勋,孙慧珍.正确评价森林水文效应[J].自然资源学报,2001,16(5):420-426.
- [45] 史立新,王金锡,宿以明,等.川西米亚罗地区暗针叶林采伐迹地早期植被演替过程的研究[J].植物生态学与地植物学学报,1988,12(4):306-313.