

托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能

马国飞, 满苏尔·沙比提

(新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 为定量评价托木尔峰自然保护区森林的水源涵养能力, 利用综合蓄水能力法, 对台兰河上游雪岭云杉森林生态系统的林冠层截留量(C)、枯枝落叶层持水量(L)、土壤层蓄水量(S)及综合水源涵养能力进行估算和分析。结果表明: (1) 研究区4样地中, 林冠层截留量表现为中海拔云杉林(29.94 mm) > 较高海拔云杉林(20.56 mm) > 高海拔云杉林(11.72 mm) > 低海拔云杉杨树混交林(5.84 mm), 而茎流量则与之相反。(2) 除中海拔云杉林外, 各样地枯枝落叶未分解层平均厚度均大于半分解层; 其中, 未分解层的平均蓄积量中高海拔云杉林最大(79.32 t/hm²), 半分解层为中海拔云杉林最大(59.47 t/hm²)。整体来看, 枯枝落叶层的最大持水量大小依次为中海拔云杉林(32.55 mm) > 高海拔云杉林(31.05 mm) > 较高海拔云杉林(30.78 mm) > 低海拔云杉杨树混交林(12.84 mm)。(3) 4样地平均土壤容重变动范围为0.73~1.06 g/cm³; 土壤孔隙度的平均值大小均为中海拔云杉林 > 较高海拔云杉林 > 高海拔云杉林 > 低海拔云杉杨树混交林; 林下土壤自然含水率随海拔高度的增加呈不断上升趋势。不同样地30 cm深土层的非毛管孔隙持水量表现为: 中海拔云杉林(37.6 mm) > 较高海拔云杉林(30.7 mm) > 高海拔云杉林(25.73 mm) > 低海拔云杉杨树混交林(13.92 mm)。(4) 研究区森林生态系统的水源涵养能力在171.27~280.84 mm之间, 低海拔云杉杨树混交林的总持水量最小, 中海拔云杉林最大。土壤层水源涵养贡献率最大, 占比在77.75%~89.10%之间; 总有效蓄水量虽远小于总持水量, 但能够很好地发挥水源涵养功能和水土保持作用。

关键词: 托木尔峰自然保护区; 台兰河上游; 雪岭云杉; 水源涵养

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0147-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.026

Water Conservation Function of Forest Ecosystems in the Upper Tailan River in the Mount Tumor Nature Reserve

MA Guofei, MANSUR Sabit

(Xinjiang Normal University, Geography Science and Tourism Collage, Urumqi 830054)

Abstract: To evaluate the water conservation capacity of forests in the Mount Tumor Nature Reserve quantitatively, comprehensive water storage capacity method was used to investigate the canopy interception capacity (C), litter water-holding capacity (L), soil water storage capacity (S) of *Picea schrenkiana* forest ecosystems in the upper Tailan River, then a comprehensive evaluation of its water conservation function was made. The results showed that: (1) In the four sample areas, the canopy interception capacity followed the order of the middle altitude spruce forest (29.94 mm) > higher altitude spruce forest (20.56 mm) > high altitude spruce forest (11.72 mm) > low altitude mixed broad leaf-conifer forest (5.84 mm), and the stem flow showed the opposite order. (2) Except for the middle altitude spruce forest, the average thickness of un-decomposed litter was thicker than that of the intermediately decomposed layer. The high altitude spruce forest had the largest average volume of decomposed layer (79.32 t/hm²), while the middle altitude spruce forest had the largest intermediately decomposed layer (59.47 t/hm²). On the whole, the rank of the maximum water holding capacity was the middle altitude spruce forest (32.55 mm) > the high altitude spruce forest (31.05 mm) > the higher elevation spruce forest (30.78 mm) > the low altitude mixed broad leaf-conifer forest (12.84 mm). (3) Soil bulk density in the four sampled forests ranged from 0.73 g/cm³ to 1.06 g/cm³. Both the average soil porosity and water holding capacity of capillary pore in the 30 cm soil layer were in the order of the middle altitude spruce forest > the higher altitude spruce forest > the high altitude spruce forest > the low altitude mixed broad leaf-conifer forest. Overall, soil moisture content of natural forests increased with the increase of the altitude. The average water holding capacity of non-capillary pore in the 30

收稿日期: 2016-12-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41461107); 新疆师范大学地理学博士点支撑学科开放课题基金项目(XJNU-DL-201608)

第一作者: 马国飞(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱区绿洲生态研究。E-mail: 1967260290@qq.com

通信作者: 满苏尔·沙比提(1963—), 男, 教授, 主要从事干旱区环境演变与灾害防控研究。E-mail: mansursa@163.com

cm soil layer followed the order of the middle altitude spruce forest (37.6 mm) > the higher altitude spruce forest (30.7 mm) > the high altitude spruce forest (25.73 mm) > the low altitude mixed broad leaf-conifer forest (13.92 mm). (4) Comprehensive water conservation capacity of the forest ecosystems in the study area was between 141.12 and 280.84 mm, with the low altitude mixed broad leaf-conifer forest and the middle altitude spruce forest having the smallest and largest water holding capacity, respectively. The soil layer contributed the most to water conservation, accounting for 77.75%—86.96%. Comprehensive effective water storage capacity was far less than the theoretical total capacity, but could work well in the water conservation function as well as water and soil conservation effect.

Keywords: Mount Tumor Nature Reserve; Upper Tailan River; *Picea schrenkiana*; water conservation

森林水源涵养功能是森林水文生态系统功能的重要组成部分^[1],森林通过林冠层、枯枝落叶层、土壤层对降水的截留、滞持、蓄积作用影响其流域内水文过程、调节降水再分配、延滞地表径流、增加土壤径流及地下径流^[2],因此其水源涵养功能实质是林冠层、枯枝落叶层、土壤层对降水进行再分配的复杂过程^[3]。自 20 世纪中叶开始,众多学者就对森林水源涵养功能的水文过程、形成机制等相关领域开展研究^[4-6],分析评价了不同区域、尺度和类型的森林植被水源涵养功能^[6-11]。天山作为对亚洲乃至全球地理格局极具影响力的地理单元,人类对天山的探索与研究从未止步。目前,对天山南北坡森林生态系统的水源涵养功能研究报道不多^[12-14],对天山托木尔峰国家级自然保护区森林生态系统水源涵养功能的研究更是少之又少^[15]。台兰河流域作为保护区重要的雪岭云杉分布区,其森林生态系统的存在对保护区水源的涵养作用显得尤为重要。因此科学测定台兰河上游流域内森林的水源涵养能力,对保护与管理自然保护区的生态环境具有重要的科学指导意义。本研究通过实地定位观测,在定量分析的基础上探讨雪岭云杉对降水再分配的影响,进一步加深对雪岭云杉水源涵养功能特征及生态效应的了解,为准确评价雪岭云杉林的生态效益提供科学参考和基础数据。

1 研究区概况

天山托木尔峰国家级自然保护区位于新疆阿克苏地区温宿县境内,地理坐标 79°50′—80°54′ E, 41°40′—42°04′ N,保护区东西长 105 km,南北宽 28 km,总面积 23.76×10⁴ hm²,是我国少有的高山自然保护区。自然保护区海拔 1 450 m~7 443 m,垂直高差近 6 000 m,共发育了从暖温带荒漠带到冰雪带 7 个垂直自然带,形成天山南坡最完整的垂直自然带谱,是以保护高山冰川和其下的森林和野生动植物及其生境为主,以水源涵养、生态旅游和科学研究为一体的综合性国家级自然保护区。自然保护区作为天山最大的冰川作用中心及众多内陆河水系的发源地,是新疆重要的水资源补给区,被誉为“天然水塔”,生态地位十分重要,是新疆重要的生态屏障。而且还

是重要的农牧业生产地,其生态环境的优劣,直接关系到新疆 2 000 多万人口的生态安全^[15]。

台兰河流域位于托木尔峰国家级自然保护区,地理坐标 80°21′44″—81°10′44″ E, 40°41′44″—42°15′13″ N,台兰河发源于西南天山最高峰托木尔峰(海拔 7 435.3 m)南麓,由大台兰河(琼台兰河)、小台兰河(克其克台兰河)、塔克拉克河汇流而成。河流最终注入塔里木盆地,全长 90 km,是一个独立水系,流域总面积 58.24×10⁴ hm²,其中以台兰河水文站控制的山区流域面积 13.24×10⁴ hm²。河流补给形式主要以高山冰川融雪、降水及地下水补给为主,多年平均径流量 7.42×10⁸ m³。台兰河流域属典型干旱大陆性气候,气候干燥,无霜期长,日照充足,多风沙,降水稀少,蒸发较大,昼夜温差大。根据台兰河水文站数据^[16],多年月平均降水量在 7 月份最大 36.2 mm,在 12 月份最小 3.65 mm;多年平均气温在 7 月份达到最高 21.9 ℃,在 1 月份最低 -9.6 ℃;多年平均降水量 182.6 mm,降水量年际变化呈上升下降趋势交替出现,年际变幅增大,总体呈现出缓慢上升趋势,上升幅度为 1.08 mm/a;多年平均气温为 8.7 ℃,总体呈现出缓慢上升趋势,增幅为 0.05 ℃/a。高山区的水面蒸发量在 600 mm 左右,中山区在 800~1 000 mm 之间。受北高南低总体地势的影响,流域自然景观垂直地带性明显,亚高山森林草原带广泛占据在 2 400~3 100 m 海拔高度范围内,阴坡以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)建群的山地阴暗针叶林为主,阳坡则以山地真草原为主,在草原类型中,克氏针茅(*Stipa krrlovii* Roshev)群系占主体,另外羊茅(*Festuca ovina*)群系、高加索针茅(*Stipa caucasica*)群系及天山异燕麦(*Helictotrichon tianschanicum* Roshev)和银穗草(*Leucopoa albida*)等植被局部分布;土壤以山地栗钙土(2 200~2 600 m)和亚高山草甸土(2 600~2 900 m)为主^[17]。

2 材料与方法

2.1 样地选择与样品采集

台兰河流域由于乔木树种的单调和生境的局限性,故所形成的林型结构也很简单,在台兰河流域的 2 400~3 100 m 海拔高度范围内,任何山体的阴坡几乎都有

雪岭云杉林分布,胸径最大可达 60~70 cm,一般为 20~30 cm,树高超过 20 m,郁闭度在 0.3~0.75 范围内,林下植被盖度很低,下坡位部分样地出现有少量藓类植物或灌木,其他多为厚层枯落物所覆盖。植被对生态水源的涵养能力是理解小流域尺度生态水文过程的基础及模拟的重要内容^[18]。因此,通过野外观测及室内试验对雪岭云杉这一典型乔木植被类型的林冠层截留能力、枯枝落叶层持水能力和土壤层的蓄水能力进行测定,研究雪岭云杉不同垂直层次对水分涵养的能力。

表 1 样地概况

样地编号	海拔/m	坡度/(°)	郁闭度	坡向	坡位	林分类型	平均胸径/cm	平均树高/m
1	2100~2108	18.6	0.45	E	山谷	云杉×杨树	17.19×28.01	19.3×27.7
2	2490~2502	35	0.75	NE	中坡	雪岭云杉	30.24	21.4
3	2526~2538	39.5	0.7	NE	中坡	雪岭云杉	20.05	20.6
4	2738~2754	36.5	0.6	NE	中坡	雪岭云杉	28.65	21.2

2.2 数据处理与分析

2.2.1 森林生态系统的水源涵养量 由于不同学者对水源涵养功能内涵的理解不同,采用的计算方法也呈现多样化,其中综合蓄水能力法虽仅从拦截蓄水作用方面入手,但其全面考虑了林冠层、枯枝落叶层、土壤层截蓄降水的综合作用,有助于比较分析森林生态系统不同作用层截蓄降水功能的大小^[5,20]。利用综合蓄水能力法,对研究区内雪岭云杉林生态系统对实测单次降雨的林冠层截留量(C, mm)、枯枝落叶层持水量(L, mm)、土壤层蓄水量(S, mm)进行测算及分析,以获得雪岭云杉林单位面积的水源涵养量,为评估区域尺度森林生态系统的水源涵养能力提供基础数据。据综合蓄水能力法,单位面积森林生态系统的水源涵养量(WR, mm)计算公式为:

$$WR=C+L+S \tag{1}$$

2.2.2 林冠层截留持水能力的测定 在每一标准样地中对降雨量、林内穿透雨量、树干茎流量进行观测。在样地内均匀布置口径 20 mm 穿透雨收集器分别测定林外降雨量和林内穿透雨量;根据样地乔木胸径调查结果,选取能够代表样地范围乔木胸径径级的标准木 10 株,在离地面 1.3 m 处用剖开的聚氯乙烯胶管蛇形环绕刮平树干,接引到树干茎流收集器中并进行体积测量。然后,将标准木按林木径阶及其权重进行统计,利用加权平均法推算出单位面积林分的树干茎流量 $S_f(\text{mm})$ ^[13]。

$$S_f=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^n\frac{F_i}{K_i}M_i \tag{2}$$

式中: M 为单位面积上的树木株数; F_i 为每个径级树干的茎流量(mL); K_i 为每个径级的树冠平均投影面积(cm^2); M_i 为每一径级树木株数; n 为总径级数。

林冠截留率计算公式为:

在台兰河上游流域雪岭云杉林分布区域不同海拔高度共设置了 4 个 20 m×20 m 的具有代表性的天然水源涵养林样地,其中,1 号样地植被类型为针阔混交林(雪岭云杉×杨树),2,3,4 号样地植被类型都为纯云杉林。据台兰河水文站数据显示研究区降水集中分布在夏季且最大降水月份为 7 月^[16]。于 2016 年 7 月份对样地进行了植被调查、林冠层截留雨量筒布置及测量、枯枝落叶采集和土壤采样及相关参数测定,林分郁闭度则采用应用全天空照片法^[19]进行测定。

$$\alpha=\frac{P-T_f-S_f}{P}\times 100\% \tag{3}$$

式中: α 为林冠截留率(%); P 为降雨量(mm); T_f 为林内穿透雨量(mm); S_f 为树干茎流量(mm)。

单位面积林冠层截留降水量(C, mm)计算公式为:

$$C=\sum_{i=1}^n\alpha_i\cdot R\cdot A_i \tag{4}$$

式中: R 为单次最大降雨量(mm); A 为测定面积(hm^2); i 为样地类型。文中单次降水量采用本次实测的最大降雨量数据。

2.2.3 林下枯枝落叶层采集处理及持水能力的测定

在所选定的各雪岭云杉林样地内进行等距采集,各取面积为 50 cm×50 cm 枯枝落叶层样方 3 个。按照枯枝落叶层的分解程度将未分解层与半分解层分别切取后原样装袋,现场称重并记录各层重量及厚度。将采集的样品带回室内进行风干、称重,并将同一林地的各样品进行均化处理,得出每一样方枯枝落叶采集量。用室内浸泡法测定林下枯枝落叶层的持水量。单位面积枯枝落叶层持水量(L, mm)计算公式为:

$$L=\sum_{i=1}^n\beta_i\cdot L_{ai}\cdot A_i \tag{5}$$

式中: β 为枯枝落叶层最大持水率(%); L_a 为枯枝落叶层蓄积量(t/hm^2); A 为测定面积(hm^2); i 为样地类型。

2.2.4 土壤层分层采样及蓄水能力的测定

在所选定的各雪岭云杉林样地下,用 100 cm³ 环刀分别在 0—10,10—20,20—30 cm 土层取样,带回室内测定土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、持水能力等物理性质。本研究中一定土层厚度的单位面积土壤层蓄水量(S, mm)计算公式为:

$$S=\sum_{i=1}^n\theta_i\cdot H_i\cdot A_i \tag{6}$$

式中: θ 为土壤孔隙度(%); H 为测定土层厚度(cm); A

为测定面积(hm^2); i 为样地类型。

3 结果与分析

3.1 林冠层的截留能力

林冠对降水的截留是森林植被对降水的初次分配,林冠截留避免雨滴对地表的直接打击,削弱降水对地表的侵蚀程度,同时,也能够截蓄部分降水量,减少地表产流量,产生削减径流量和涵养水源的生态效应。林冠截留主要受林分自身特征(林种、林冠结构、林龄、郁闭度等)和环境因素(降水特征、风速、温度等)等诸多因素的共同影响^[3]。而在以上因素中,对相同生境下起源、林龄相同的同一林分来说,林冠截留量的大小主要由林分郁闭度和降水特征所决定^[21]。

对研究区雪岭云杉林区野外实测数据显示(表 2),本次测定的单次降雨量较大,平均量在 40 mm 左右,但是降雨量并不均匀。随着海拔高度的增加,降雨量先增后降,样地 3 降雨量最大为 47.67 mm,由此推断该次实测降雨中心区在 2 500~2 600 m 海拔高度。森林林冠穿透雨量及截留量的差异显著,除了样地 1 的穿透率达到较高的 77.38% 以外,其他 3 个样地均相对较低,尤其是样地 2 的穿透率只有 30.27%,与之相对的是,除样地 1 的林冠截留率为较低的 19.26% 外,其他 3 个样地均偏高,其中样地 2 的林冠截留率达到 68.09%。这与我国主要森林生态系统林冠截留率的平均值变动范围相较偏大^[9]。研究区受干旱性气候和塔克拉玛干沙漠的影响较大,降水偏少,7 月份降雨相对较多,但由于此次降雨强度并不大,降雨历时长达 12 h,加上云杉林的树体干燥程度较大,云杉林郁闭度较高,形成了有效的林冠截留面,对降雨的截持作用较为明显。

研究区 4 个样地中,样地 1 林冠层截留率最小(19.26%),茎流率最大(3.36%)。样地 1 林分郁闭度仅为 0.45,林内空隙度较大,导致降雨多直接穿过空隙而未被林冠层截留,而样地 1 中杨树树干光滑挺直,且吸附水分能力差,容易形成树干茎流。样地 2 林冠层截留率最大(68.09%),茎流率最小(0.77%)。样地 2 林分郁闭度为 0.75,较高的林分郁闭度形成有效的林冠截留面,对降雨截留效果显著。因平均胸径和林龄较大,云杉树皮常龟裂呈片状,延缓干流的下移,在流经树干时主要耗于干燥树皮的湿润,很少能到达胸径位置,树枝的开张角度较大,成熟枝接近 90°;针叶成四棱形保持直立或伸张状态,极不利于树冠截留降雨向树干集中造成的。样地 3 树干茎流率在单一云杉树种的样地 2,3,4 中最大(1.30%),这与其降雨量大小有着直接的关系。而样地 4 的树干茎流率稍小于样地 3,林冠层截留率则在样地 2,3,4 中最小(28.71%)。由于样地 4 海拔较高,降雨间隔时

间较短,林内湿度较大,云杉树干并不过于干燥,此次降雨形成的干流没有过多的消耗在树皮的浸润,云杉林冠层也相对潮湿,截留能力下降。

表 2 林冠截留层对降水分配特征

样地 编号	降雨量/ mm	穿透 雨量/mm	百分比/ %	树干茎 流量/mm	百分比/ %	冠层截 留量/mm	百分比/ %
1	30.33	23.47	77.38	1.02	3.36	5.84	19.26
2	43.97	13.69	31.14	0.34	0.77	29.94	68.09
3	47.67	26.49	55.57	0.62	1.30	20.56	43.13
4	40.82	28.67	70.24	0.43	1.05	11.72	28.71

3.2 林下枯枝落叶层的持水能力

枯枝落叶层是森林植被对降水再分配的第 2 个作用层,在森林涵养水源功能中的地位不可或缺。它不仅益于森林土壤的发育和改良,而且因其结构疏松,增加地表的粗糙度,具有良好的透水性和持水能力^[8]。在截持降水、防止土壤溅蚀、阻延地表径流、增加土壤养分含量、抑制土壤水分蒸发等方面都具有非常重要的作用^[9]。枯枝落叶层水文效应的强弱主要与其蓄积量和持水率的大小有很大关系。

3.2.1 枯枝落叶层的蓄积量 由表 3 可知,除样地 2 外,各样地枯枝落叶未分解层平均厚度均大于半分解层,未分解层厚度是半分解层的 1.16~2.86 倍,各样地平均蓄积量中,样地 1 较其他 3 样地差异明显,仅为其他样地平均蓄积量的 50.4%~52.4%,样地 1 海拔较低,降水少蒸发大,树木生理需水供给不充足,导致林分郁闭度低,枯枝落叶蓄积量小。雪岭云杉林内地表干燥,林下灌草植被稀少,枯枝落叶组成单一,而且其郁闭度较高,因而具有较厚的未分解层和较高的蓄积量。除样地 1 外,样地 2,3,4 枯枝落叶未分解层的平均蓄积量大小为样地 2<样地 3<样地 4,而半分解层则相反,为样地 2>样地 3>样地 4,这主要受样地所在的垂直海拔高度不同而引起气温变化不同所影响,随着垂直高度的增加,气温逐渐下降,微生物活动减弱,枯枝落叶层分解速度减缓,故出现未分解层枯落物随海拔高度而累积增加,而半分解层变薄的现象。另外人为干扰及放牧活动的程度不同也影响枯枝落叶层蓄积量的变化。

表 3 枯枝落叶层蓄积量及持水能力

样地 编号	分解 程度	厚度/ cm	蓄积量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	自然 持水率/%	最大 持水率/%	最大 持水量/mm
1	未分解层	3.0	30.21	11.90	215.44	6.51
	半分解层	2.4	26.43	27.46	239.36	6.33
2	未分解层	4.0	52.88	28.14	286.75	15.16
	半分解层	4.3	59.47	41.73	292.39	17.39
3	未分解层	4.3	56.85	26.61	278.88	15.85
	半分解层	3.7	51.17	38.38	291.68	14.93
4	未分解层	6.0	79.32	41.28	284.75	22.59
	半分解层	2.1	29.0	70.28	291.55	8.46

3.2.2 枯枝落叶层的持水能力 由表 3 可知,自然持水率整体上呈不断上升趋势,自然持水量表现为样地 1(10.85 t/hm²)<样地 3(34.77 t/hm²)<样地 2(39.70 t/hm²)<样地 4(53.12 t/hm²),受垂直高度增加而引起的降水量增加是这一趋势出现的主要因素,另一方面则因气温低导致蒸发率下降使得枯枝落叶层持水率保持较高程度。而在各样地枯枝落叶层中,半分解层的自然持水率、最大持水率均大于未分解层,枯枝落叶的分解程度影响枯枝落叶层的持水能力,分解程度越高,半分解层枯枝落叶量越大,枯枝落叶层的持水能力越强^[22]。在 4 样地中,样地 1 植被类型为云杉与杨树组成的针阔混交林,其最大持水率偏低与其他纯云杉林样地,这与贺淑霞等^[6]的研究结果并不一致,其中原因有待进一步研究。而样地 2 的最大持水率是最高的,样地 3 和样地 4 的最大持水率水平相当。整体来看,4 样地枯枝落

叶层的最大持水量大小依次为样地 2(32.55 mm)>样地 4(31.05 mm)>样地 3(30.78 mm)>样地 1(12.84 mm)。

3.3 林下土壤层的蓄水能力

森林土壤是森林涵养水源的主体,林地存在大量腐根所形成的孔隙、动物洞穴及其他非毛管孔隙;同时含有较丰富的有机质和水稳性团聚体。因此,地表枯枝落叶层截持的降水会沿土壤孔隙下渗,并蓄存于土壤孔隙中或转变为地下径流^[23]。林下土壤的蓄水能力与土壤的厚度和土壤的孔隙度状况密切相关。不同林地的蓄水能力差异较大。土壤孔隙可分为毛管孔隙和非毛管孔隙 2 种,毛管孔隙蓄存的水分可供植物根系吸收或用于土壤蒸发,而非毛管孔隙除了为饱和土壤水分提供通道外,还为水分的蓄存提供了空间。林下土壤的蓄水能力主要反映在土壤非毛管孔隙的持水能力上^[24]。

表 4 土壤层水文物理性质及蓄水能力

样地 编号	土层 深度/cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/%			自然 含水率/%	饱和 持水量/mm	非毛管 持水量/mm
			总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度			
1	0—10	1.07	50.79	46.21	4.58	17.26	50.79	4.58
	10—20	1.02	51.65	46.34	5.31	15.33	51.65	5.31
	20—30	1.09	50.16	46.13	4.03	15.22	50.16	4.03
2	0—10	0.74	75.03	61.06	13.97	32.76	75.03	13.97
	10—20	0.71	72.19	60.18	12.01	28.39	72.19	12.01
	20—30	0.94	71.13	59.51	11.62	23.92	71.13	11.62
3	0—10	0.74	71.67	60.85	10.82	27.59	71.67	10.82
	10—20	0.75	68.64	58.19	10.45	27.36	68.64	10.45
	20—30	0.92	65.97	56.54	9.43	23.15	65.97	9.43
4	0—10	0.73	67.15	58.13	9.02	46.24	67.15	9.02
	10—20	0.78	65.70	57.05	8.65	31.98	65.70	8.65
	20—30	0.94	65.18	57.12	8.06	27.19	65.18	8.06

3.3.1 土壤层水文物理性质 在土壤水文物理特性中,土壤容重和孔隙度会直接影响土壤的通气性和透水性,是决定林下土壤水源涵养功能的重要因素。由于林地间枯落物组成、分解程度及地下根系的生长状况存在一定的差异,从而导致各林地间土壤容重和孔隙度大小有所不同。一般认为不同林地的土壤容重均会随土壤深度的增加而增加^[10]。由表 4 可知,样地 1、样地 2 的林下 0—10 cm 土层土壤容重大于 10—20 cm 土层,这与样地 1、样地 2 受人为及放牧活动的干扰程度相关较大,受牲畜踩踏导致表层土壤变得紧实,从而使土壤容重增加。4 样地平均土壤容重变动范围为 0.73~1.06 g/cm³,大小依次为样地 1>样地 4>样地 3>样地 2,样地 1 是样地 2 的 1.33 倍,产生差异的原因是凋落物组成特性、土壤发育程度和土壤中林木根系分布不同所致。除样地 1 土壤孔隙度受土壤容重变化的影响而变异外,其他各样地土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均随土层的加

深而逐渐降低,变化趋势相同(表 4)。4 样地平均土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的变动范围分别为 50.87%~72.78%,46.23%~60.25%,4.64%~12.53%,大小依次均为样地 2>样地 3>样地 4>样地 1。

3.3.2 土壤层的蓄水能力 在土层厚度一定时,森林的水源涵养性能主要取决于土壤的孔隙特性。非毛管孔隙能快速吸纳降水并及时下渗,更加有利于涵养水源,因此其持水量被众多学者作为评价森林土壤水源涵养能力的重要指标^[10,24]。研究结果表明(表 4),除样地 1 因受非毛管孔隙度大小的影响而变异外,其他 3 样地 30 cm 深土层的非毛管孔隙持水量均随土层深度的加深而减少,表现出土壤非毛管孔隙度随土层的加深而逐渐降低的变化趋势。不同样地 30 cm 深土层非毛管孔隙的持水量表现为样地 2(37.6 mm)>样地 3(30.7 mm)>样地 4(25.73 mm)>样地 1(13.92 mm)。在水平尺度上,林下土壤的自然含水率大小受海拔高度和林分特征的影响较大,在垂

直尺度上,其与土壤孔隙度和土壤渗透性能有很大关系。整体上,4 样地林下土壤自然含水率随海拔高度的增加而不断提高,样地 2 林下土壤自然含水率可能受林分特征影响较大,郁闭度及林龄较大,对林下土壤水分保持能力较强,自然含水率超过样地 3,样地 4 的林下土壤自然含水率最高,平均含水率达到 35.14%,为样地 1 的 2.2 倍。土壤孔隙是土壤水分的贮存库,其大小和数量直接影响着土壤持水量,土壤非毛管孔隙度越大则土壤结构越疏松,土壤的持水能力就越强。这与蔡婷等^[25]对黄埔江上游林分水源涵养功能的研究结果相一致。

3.4 雪岭云杉林的水源涵养能力

3.4.1 森林生态系统的水源涵养能力 森林生态系

表 5 森林生态系统的水源涵养能力								
单位:mm								
样地 编号	林分 类型	林冠层降水 截留量	枯枝落叶层 最大持水量	30 cm 土壤 总持水量	总持 水量	枯枝落叶层 有效拦蓄量	30 cm 土壤 有效蓄水量	总有效 蓄水量
1	云杉×杨树	5.84	12.83	152.60	171.27	9.83	13.92	29.59
2	雪岭云杉	29.94	32.55	218.35	280.84	23.70	37.60	91.24
3	雪岭云杉	20.56	30.78	206.28	257.62	22.69	30.70	73.95
4	雪岭云杉	11.72	31.04	198.03	240.79	21.07	25.73	58.52

3.4.2 森林生态系统的有效水源涵养能力 森林生态系统的总持水量大小反映的是森林生态系统水源涵养功能的大小,与实际降水的森林生态系统有效蓄水量大小并不相同。本次野外实测的是单次降雨在森林生态系统中各截留层的分配情况,因此林冠层截留量采用实测单次降雨的数据计算。枯枝落叶层的有效拦蓄率(量)采用最大持水率(量)的 85%与自然持水率(量)的差值来估算^[22]。所以,采用有效拦蓄量估算枯枝落叶层对降水的实际拦蓄量。土壤有效蓄水量采用土壤非毛管孔隙度持水量来衡量研究区各样地土壤有效蓄水量^[24]。由表 5 可知,总有效蓄水量远小于总持水量,前者占比分别为后者的 17.28%,32.49%,28.71%,24.30%,但是,相较于本次实测降雨量来看,除样地 1 稍小于实际降雨量外,其他样地均大于实际降雨量,可截留绝大部分的降雨,发挥了很好的水源涵养功能和水土保持作用。

4 讨论与结论

(1)研究区 4 个样地中,林冠层截留量大小表现为样地 2(29.94 mm) > 样地 3(20.56 mm) > 样地 4(11.72 mm) > 样地 1(5.84 mm),而茎流量则与之相反。样地 3 树干茎流率在样地 2、样地 3、样地 4 中最大(1.30%);而样地 4 的树干茎流率稍小于样地 3,林冠层截留率则在样地 2、样地 3、样地 4 中最小(28.71%)。由于研究区特殊的地理位置和气候条件,受大陆干旱性气候和塔克拉玛干沙漠的影响大,降水少,且林分树体干燥度大,林冠截留率偏大于我国主要森林生态系

统的水源涵养功能来源于地上林冠层、枯枝落叶层和土壤层 3 个作用层之间的互相配合,即林冠层对降水进行截留,枯枝落叶层吸收截持降水,土壤层再进行截留及蓄水^[25]。林分总持水量越大,表明林分涵养水分的能力越强,各样地森林生态系统的总持水能力随时空变化而改变。由表 5 可知,研究区 4 个样地森林生态系统的水源涵养能力在 171.27~280.84 mm 之间,样地 1 的总持水量最小,样地 2 最大。由于所处生境不同,其水源涵养能力也有所差异。在各水源涵养作用层中,土壤层对降雨的截蓄和再分配作用最为显著,4 个样地土壤层水源涵养贡献率分别为 89.10%,77.75%,80.04%,82.24%,枯枝落叶层与林冠层水源涵养贡献率相较于土壤层要低的多,但仍然是十分重要的部分。

统林冠截留率的平均值变动范围。相关资料表明,研究区多年月平均降水在 7 月份最大(36.2 mm),由此说明本次实测降雨具有较好的代表性。尽管此次野外试验对降雨量的监测及林冠层截留量的测定采用随停随测的方法以减少误差,尽量使所得数值精准。但忽略了森林蒸发散消耗这一因素的影响,测定结果可能会与实际数据有一定出入。

(2)除样地 2 外,其他各样地枯枝落叶未分解层平均厚度均大于半分解层;各样地平均蓄积量中,样地 1 较其他 3 样地差异明显,仅为其他样地平均蓄积量的 50.4%~52.4%;除样地 1 外,样地 2、样地 3、样地 4 枯枝落叶未分解层的平均蓄积量大小为样地 2 < 样地 3 < 样地 4,而半分解层则相反,为样地 2 > 样地 3 > 样地 4;整体来看,4 样地枯枝落叶层的最大持水量大小依次为样地 2(32.55 mm) > 样地 4(31.05 mm) > 样地 3(30.78 mm) > 样地 1(12.84 mm)。研究区各样地枯枝落叶层的持水能力大小与其干燥程度、蓄积量大小及分解程度有关。枯枝落叶越干燥,蓄积量越大,分解程度越好,持水能力就越强。

(3)研究区 4 林地的平均土壤容重变动范围为 0.73~1.06 g/cm³,大小依次为样地 1 > 样地 4 > 样地 3 > 样地 2,样地 2 是样地 1 的 1.45 倍;4 样地平均土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的变动范围分别为 61.87%~72.78%,57.23%~60.25%,4.64%~12.53%,大小依次均为样地 2 > 样地 3 > 样地 4 > 样地 1;不同样地 30 cm 深土层非毛管孔隙的

持水量大小顺序为样地 2(37.6 mm) > 样地 3(30.7 mm) > 样地 4(25.73 mm) > 样地 1(13.92 mm); 整体上, 4 样地林下土壤自然含水率随海拔高度的增加而不断提高。林下土壤层受人为及放牧活动的干扰程度较大, 牲畜踩踏导致表层土壤变得紧实, 从而使土壤容重增加和孔隙度下降, 影响土壤层的蓄水能力, 所得土壤蓄水量占水源涵养总量比例偏低与其他区域研究结果。另外, 研究区土层浅薄及林冠层截留率的偏高也对此产生一定影响。

(4) 研究区 4 样地森林生态系统的水源涵养能力在 171.27~280.84 mm 之间, 样地 1 的总持水量最小, 样地 2 最大。4 样地土壤层水源涵养贡献率分别为 89.10%, 77.75%, 80.04%, 82.24%。总有效蓄水量远小于总持水量, 前者占比分别为后者的 17.28%, 32.49%, 28.71%, 24.30%, 但是, 相较于本次实测降雨量来看, 除样地 1 稍小于实际降雨量外, 其他样地均大于实际降雨量, 可截留绝大部分的降雨, 发挥了很好的水源涵养功能和水土保持作用。

本文选取了雪岭云杉森林生态系统林冠层、枯枝落叶层、土壤层 3 个作用层来综合评价研究区森林的水源涵养能力, 但各项指标都只从静态涵养水源方面进行了分析, 并未对动态涵养水源方面进行估算分析, 在进一步的深入研究观测中应该加强对森林水文功能的动态监测, 以客观地对研究区云杉林区水源涵养和保土功能进行全面评价, 为保护区森林生态建设提供更精确可靠的依据。

参考文献:

- [1] 王利, 于立忠, 张金鑫, 等. 浑河上游水源地不同林型水源涵养功能分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 249-255.
- [2] Julian J P, Gardner R H. Land cover effects on runoff patterns in eastern Piedmont (USA) watersheds [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 1525-1538.
- [3] Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [4] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [5] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [6] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [7] 韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [8] 齐特, 李玉婷, 何会宾, 等. 冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 60-67.
- [9] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [10] 巍强, 张秋良, 代海燕, 等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [11] 汪永英, 段文标. 小兴安岭南坡 3 种林型林地水源涵养功能评价[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 31-36.
- [12] 刘端, 张毓涛, 郝帅, 等. 天山云杉林下土壤物理性质空间异质性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36(3): 397-402.
- [13] 王丙超, 刘萍, 张毓涛, 等. 天山中段天山云杉林林冠降雨截留特征研究[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(2): 76-80.
- [14] 李海军, 张新平, 张毓涛, 等. 基于月水量平衡的天山中部天然云杉林森林生态系统蓄水功能研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 227-232.
- [15] 满苏尔·沙比提, 娜斯曼·那斯尔丁, 艾萨迪拉·玉苏甫. 天山托木尔峰国家级自然保护区生态系统服务价值评估[J]. 山地学报, 2016, 34(5): 599-605.
- [16] 田龙. 台兰河流域水文要素变化分析及新安江模型的改进与应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [17] 张祥, 彭夏岁. 天山托木尔峰南坡地区旅游发展模式创新研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 199-203.
- [18] 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.
- [19] 朱教君, 康宏樟, 胡理乐. 应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度)[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1234-1240.
- [20] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603-611.
- [21] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [22] 王美莲, 王飞, 姚晓娟, 等. 不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 925-931.
- [23] 孙昌平, 刘贤德, 雷蕾, 等. 祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 68-72.
- [24] 陈引珍, 程金花, 张洪江, 等. 缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 66-70.
- [25] 蔡婷, 李阿瑾, 宋坤, 等. 黄浦江上游近自然混交林和人工纯林水源涵养功能评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 36-40.