

# 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能

马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪

(新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 为了研究托木尔峰自然保护区生态系统的水源涵养功能, 选择台兰河上游为研究区域, 采用野外观察与室内试验相结合的方法, 分别对该区域具有代表性的雪岭云杉林、灌木林、草地植被, 从林冠层、枯枝落叶层和土壤层3个层次及综合性的水源涵养能力进行了定量分析。结果表明: 研究区云杉林林冠截留能力优于灌木林, 穿透降雨量及林冠截留量平均值均大于灌木林。除草地外, 各样地枯枝落叶未分解层平均厚度均大于半分解层, 云杉林枯枝落叶层的厚度和蓄积量明显大于灌木林, 不同植被类型枯枝落叶半分解层的自然持水率、最大持水率均高于未分解层, 云杉林枯枝落叶层自然持水率、最大持水率均高于灌木林, 灌木林和云杉林的枯枝落叶未分解层有效拦蓄量均高于半分解层。不同植被类型平均土壤容重大小表现为草地>灌木林>云杉林, 土壤孔隙度的平均值大小则与之相反; 不同植被类型的土壤自然含水率、饱和含水量及非毛管持水量均表现为云杉林>灌木林>草地, 而不同植被类型30 cm 深土层的蓄水能力变化则存在差异。研究区不同植被类型的水源涵养能力在181.06~237.63 mm, 综合、有效水源涵养能力均表现为云杉林>灌木林>草地, 其中土壤层的涵养贡献率最大, 总有效蓄水量远小于总持水量。综上所述, 台兰河上游云杉林和灌木林具有较好的涵养水源能力, 放牧强度和人为干扰是影响研究区不同植被类型尤其是生境脆弱的草地植被水源涵养功能的重要因素。

**关键词:** 托木尔峰自然保护区; 台兰河; 雪岭云杉; 灌木; 草地; 水源涵养

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0210-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.033

## Water Conservation Function of Different Vegetation Types in the Upper Tailan River in Mount Tumor Nature Reserve

MA Guofei, MANSUR Sabit, ZHANG Xueqi

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

**Abstract:** To evaluate the water conservation function of ecological system in Mount Tumor Nature Reserve, we selected the upstream of the Tailan River as the study area to quantitatively analyze the water conservation capacities of typical *Picea schrenkiana* forest, shrub woodland and grassland by using the combined method of field observation and laboratory experiments. The water conservation capacities in three layers including the forest canopy, litter layer and the soil layer, as well as the comprehensive capacity were analyzed. The result showed that the canopy interception capacity of *Picea schrenkiana* forest was greater than that of the shrub woodland in the study area, and the average throughfall and canopy interception were both greater than those of the shrub woodland. The average thickness of undecomposed layer was higher than that of semi decomposed layer in all kinds of vegetation, and the thickness and volume of litter layer in *Picea schrenkiana* forest were significantly greater than those in the shrub woodland. In all three types of vegetation, the natural and maximum water holding capacities of the semi decomposed layers were all higher than those of the undecomposed layers, and the natural and maximum water holding capacities of litter layer in *Picea schrenkiana* forest were both higher than those in the shrub woodland. The modified interception amounts of undecomposed layer were higher than those of semi decomposed layer in *Picea schrenkiana* forest and the shrub woodland. The average soil bulk density of different vegetation types followed the order of grassland > shrub woodland > *Picea schrenkiana* forest, while the order of soil porosity mean value was opposite; the natural moisture content, saturated water content and non-capillary water holding capacity of dif-

收稿日期: 2017-08-22

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

ferent vegetation types followed the order of *Picea schrenkiana* forest > shrub woodland > grassland, but the water storage capacity of soil layer deeper than 30 cm varied among different vegetation types. The water conservation capacities of different vegetation types were 181.06 ~ 237.63 mm, and the comprehensive and effective water conservation capacities both listed in the order of *Picea schrenkiana* forest > shrub > grassland. The soil layer contributed greatest in water conservation, and the total effective storage capacity was far less than the total water. In summary, *Picea schrenkiana* forest and shrub woodland in the study area had better water conservation ability. Grazing intensity and human disturbance were the important factors that affected the water conservation function of different vegetation types in the study area, especially for vulnerable grassland.

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

山地生态系统是大陆生态系统中重要的水源涵养区,而水源涵养功能是山地生态系统服务的重要功能之一<sup>[1]</sup>。水源涵养功能受自身结构状况和外部环境(海拔、地形、气候、土壤等)诸多因素的综合作用而具有复杂性和动态性特征,其水源涵养效应也会有所差异<sup>[2-3]</sup>。目前对单一植被类型水源涵养功能的相关研究已经相当丰富<sup>[4-10]</sup>,但是山区生态系统植被类型并不是单一的森林植被。山地生态系统的水源涵养功能是通过不同植被类型在不同作用层面上对水分的涵养作用来体现的。国内对山地生态系统不同植被类型的综合性水源涵养功能方面的相关研究并不多<sup>[1,11-13]</sup>,但对天山托木尔峰国家级自然保护区的相关研究还未见报道。

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(东经 79°50′—80°54′,北纬 41°40′—42°04′),保护区东西长 105 km,南北宽 28 km,总面积 23.76×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,是我国少有的高山自然保护区,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,也是以水源涵养、生态旅游和科学研究为一体的综合性国家级自然保护区。自然保护区海拔从 1 450 m 升至 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。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<sup>[14]</sup>。因此,本文通过实地定位观测,在定量分析的基础上探讨托木尔峰自然保护区内台兰河上游不同植被类型对降水再分配的影响,旨在揭示山地生态系统不同层次对降水的截蓄涵养能力大小,以期保护区自然资源的科学管理以及水土保持综合效益的分析提供基础资料,并为该区植被生态恢复演替的深化研究提供理论

依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区设在托木尔峰国家级自然保护区南坡台兰河流域上游河谷,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。基于台兰站 1957—2010 年气象观测数据显示,多年月平均降水量在 7 月最大为 36.2 mm,在 12 月最低为 3.65 mm;多年平均气温在 7 月达到最高为 21.9 °C,1 月最低为 -9.6 °C;多年平均降水量为 182.6 mm,降水量年际变化为上升下降趋势交替出现,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 °C,总体呈现出缓慢上升趋势,增幅为 0.05 °C/a<sup>[15]</sup>。高山区的水面蒸发量在 600 mm 左右,中山区在 800~1 000 mm。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,以荒漠带为基带(海拔 1 900 m 以下),随着地形和土壤条件的不同,发育着不同的灌木和小半灌木。主要有霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、琵琶柴(*Reaumuria soongarica*)、假木贼(*Anabasis truncata*)等植被群落,一般盖度不超过 20%,土壤类型以山地棕漠土为主。草地为山地荒漠草原带(海拔 1 900~2 200 m 或阳坡 2 300 m),其分布较狭窄,主要有戈壁针茅(*Stipa gobica*)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)和高加索针茅(*Stipa caucasica*)群落,总盖度在 30%~50%,以山地棕钙土为主。灌木类植被锦鸡儿(*Caragana turfanensis*)广泛分布于此。亚高山森林草原带及以上植被类型带中,灌木植物主要作为伴生成分出现,主要有蔷薇(*Rosa sp.*)、柃子(*Cotoneaster sp.*)、锦鸡儿、西伯利亚小檗(*Berberis sibirica*)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla*)等植被局部分布;林地广泛占据在 2 400~3 100 m 海拔范围内,阴坡以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)建群的山地阴暗针叶林为主,郁闭度约 0.3~0.7,林下出现藓类植物

或灌木,下坡位草类植物多糙苏(*Phlomis umbrosa*)、车前草(*Plantago asiatica*),另外羊茅(*Festuca ovina*)及天山异燕麦(*Helictotrichon tianschanicum*)和银穗草(*Leucopoa albida*)等植被有局部分布,群落总盖度达 40%~60%;阳坡则以山地真草原为主,盖度在 30%左右;以山地栗钙土为主<sup>[16]</sup>。

## 1.2 样地设置与调查方法

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在 7 月<sup>[15]</sup>。于 2016 年 7 月在

托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游河谷区域进行了野外调查,根据海拔、坡度、坡向、植被生长状况等,沿河谷不同海拔高度分别选择设置了草地(5 m×5 m)、灌木林地(10 m×10 m)和云杉林地(30 m×30 m)共 12 块(不同植被类型各 4 块)具有代表性的标准样地,在标准地内对植被进行每木检尺,测定树高、胸径(基径)等因子,并记录海拔、坡度、坡向、坡位、郁闭度(盖度)、土壤类型等指标。各样地基本概况见表 1。

表 1 研究区标准样地基本概况

植被类型	海拔/ m	土壤 类型	坡度/ (°)	坡向	坡位	平均高/ m	平均冠幅/ cm	平均胸径(基径)/ cm	郁闭度(盖度)/ %
草地	2100	棕漠土	25	NE	坡下	0.34			35.0
灌木林	2400	山地棕钙土	33	NE	坡中	1.32	1.30	3.14	47.5
云杉林	2600	山地栗钙土	32	NE	坡中	20.60	4.20	26.74	62.5

## 1.3 测定方法

1.3.1 林冠层截留能力的测定 在云杉林地和灌木林地的每一标准样地内均匀布置口径分别为 20, 10 cm 穿透雨收集器测定林外降雨量和林内穿透雨,为尽可能减小山地地形和气流对降雨量的影响,在雨量收集器受风口上安装避风装置,雨量收集器内沿安装了聚雨装置以减少蒸发损耗。灌木林内安置的穿透雨收集器受灌木高度的限制尽可能安放在较低的位置,以取得更好的试验效果。根据云杉林地样地乔木胸径调查结果,于每一云杉林标准样地内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。受灌木分枝点过低、分枝繁多等诸多因素的影响,很难较准确地测定灌木的树干茎流量,因此本研究未对其进行测定。在每次降雨后即时测定林外降雨量和林内穿透雨,然后准确计算林冠截留率等指标。林冠截留率计算公式为:

$$\alpha = \frac{P - T_f - S_f}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\alpha$  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计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot R \cdot A_i \quad (2)$$

式中: $C$  为单位面积林冠层截留降水量(mm); $R$  为单次最大降雨量(mm); $A$  为面积( $\text{hm}^2$ ); $i$  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。

1.3.2 枯枝落叶层采集处理及持水能力的测定 在所选定的各林地样地内(草地样地因草本植物处于生长旺盛期末采集到枯枝落叶样品)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鲜重量及厚度。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<sup>[17]</sup>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计算公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot L_{ai} \cdot A_i \quad (3)$$

式中: $L$  为单位面积枯枝落叶层持水量(mm); $\beta$  为枯枝落叶层最大持水率(%); $L_a$  为枯枝落叶层蓄积量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $A$  为面积( $\text{hm}^2$ ); $i$  为样地类型。

1.3.3 土壤层分层采样及蓄水能力的测定 在所选定的不同植被类型样地内随机布设 3 个样点,各挖取一个土壤剖面,依照机械分层取土法用 100  $\text{cm}^3$  环刀分别在 0-10, 10-20, 20-30 cm 土层取原状土样,每个组合重复 3 次。用烘干法测定土壤含水量,环刀法测定土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度等物理性质。本研究中一定土层厚度的土壤蓄水量计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot H_i \cdot A_i \quad (4)$$

式中: $S$  为单位面积土壤层蓄水量(mm); $\theta$  为土壤孔隙度(%); $H$  为测定土层厚度(cm); $A$  为面积( $\text{hm}^2$ ); $i$  为样地类型。

1.3.4 不同植被类型的综合水源涵养量 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、枯枝落叶层和土壤层截蓄降水的综合作用,有助于比较分析不同植被生态系统的不同作用层截蓄降水功能的大小<sup>[18]</sup>。利用综合蓄水能力法,对研究区内乔、灌木林样地实测单次降雨的林冠层截留量、枯枝落叶层持水量、土壤层蓄

水量及草地样地土壤层蓄水量分别进行测算及分析,以获得不同植被类型单位面积的综合水源涵养量,为评估区域尺度上的生态系统水源涵养能力提供基础数据。据综合蓄水能力法,单位面积山地生态系统的水源涵养量计算公式为:

$$WR = 10 \sum_{i=1}^n A_i \cdot (C_i + L_i + S_i) \quad (5)$$

式中:WR 为单位面积综合水源涵养量(mm); $A_i$  为第  $i$  种植被类型的总面积( $\text{hm}^2$ ); $C_i$  为  $i$  植被类型的林冠层截留能力(mm); $L_i$  为枯枝落叶层持水能力(mm); $S_i$  为土壤层蓄水能力(mm);10 为单位换算系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型林冠层的截留能力

林冠层对降水的截留是植被对降水的初次分配,

表 2 林冠截留层对降水分配特征

植被类型	降雨量/ mm	穿透降雨		树干茎流		林冠截留	
		降雨量/mm	占比/%	树干茎流量/mm	占比/%	林冠截留量/mm	占比/%
草地	19.75±1.71						
灌木林	28.83±4.32	14.12±1.54	49.90±2.30			14.71±2.88	50.10±2.30
云杉林	40.70±3.73	23.08±3.31	58.58±10.21	0.60±0.15	1.62±0.59	17.02±5.26	39.80±10.63

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

### 2.2 不同植被类型枯枝落叶层的持水能力

2.2.1 枯枝落叶层的蓄积量 由表 3 可知,除草地外,灌木林和云杉林均存在枯枝落叶未分解与半分解层。不同植被枯枝落叶未分解层的平均厚度均大于半分解层,其中灌木林的枯枝落叶未分解层达到半分解层的 4.5 倍。灌木林海拔较低,降水少而蒸发大,且林分郁闭度较低,这使得灌木林枯枝落叶层蓄积量较少并且大部分以未分解形式覆盖于土壤表层,随着海拔的上升,气温逐渐下降,微生物活跃程度降低,枯枝落叶的分解速度减缓,因此枯枝落叶层随海拔高度上升而累积增加。研究区云杉林的分布区域整体海拔高于灌木林,枯枝落叶层的厚度和蓄积量明显大于灌木林,其中云杉林枯枝落叶未分解层厚度约为灌木林的 2.89 倍,半分解层厚度则高达 9.48 倍,在蓄积量方面,云杉林枯枝落叶未分解层约为灌木林的 3.53 倍,半分解层约为灌木林的 8.03 倍。

表 3 枯枝落叶层蓄积量及持水能力

植被类型	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/ %	有效拦蓄量/ mm
草地	未分解层					
	半分解层					
灌木林	未分解层	1.50±0.09a	15.51±0.78a	19.81±5.35b	217.42±5.37ab	2.56±0.12ab
	半分解层	0.33±0.13b	5.17±1.85b	36.06±8.44a	261.56±21.64ab	0.96±0.34b
云杉林	未分解层	4.33±0.62ab	54.82±10.06ab	26.98±6.01b	266.46±34.17b	11.11±2.22a
	半分解层	3.13±0.52ab	41.52±8.16ab	44.46±9.13ab	278.75±26.26a	8.21±1.94ab

注:各列不同字母表示在  $\alpha=0.05$  水平上的显著性差异。

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。由表 2 可知,在 3 种不同植被类型中,草地的实测单次降水量最小,云杉林最大,降水量从海拔 2 100 m 至 2 600 m 呈增加趋势。云杉林穿透降雨量平均值及占比均大于灌木林,两者间存在显著差异( $P<0.05$ )。云杉林所处海拔较高,降水间隔时间较短,林间湿度大,加上云杉树叶生物特性的关系,受叶子表面形成的类似于蜡质的膜层阻隔,吸附水分的能力较差。云杉林的林冠层截留量平均值大于灌木林,平均值占比则低于灌木林,云杉林冠幅相对较大,且林冠层相较灌木林要厚的多,接触面大;另外,降雨量的差异也是造成不同植被类型林冠截留量大小的原因。

2.2.2 枯枝落叶层的持水能力 由表 3 可知,灌木林的枯枝落叶层自然持水率整体上低于云杉林,这与其降水量的大小分布相一致。不同植被类型枯枝落叶半分解层的自然持水率、最大持水率均高于未分解层,其中,灌木林、云杉林的枯枝落叶半分解层自然持水率分别达到未分解层的 1.82、1.65 倍,而不同植被类型枯枝落叶半分解层的最大持水率则稍高于未分解层。在有效拦蓄量方面,灌木林和云杉林的枯枝落叶未分解层有效拦蓄量均高于半分解层,分别达到后者的 2.67、1.35 倍,这与不同植被类型下枯枝落叶不同层次的蓄积厚度及蓄积量密切相关。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<sup>[19]</sup>。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。

### 2.3 不同植被类型土壤层的蓄水能力

2.3.1 土壤层水文物理性质 由表 4 可知,在土壤容重方面,草地土壤 0—10 cm 最大为 1.30 g/cm<sup>3</sup>, 10—20 cm 最小;灌木林土壤 20—30 cm 最大为 1.00 g/cm<sup>3</sup>, 10—20 cm 最小;云杉林土壤 20—30 cm 最大为 0.97 g/cm<sup>3</sup>;整体表现为草地>灌木林>云杉林。总孔隙度方面,草地土壤 20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm;灌木林土壤 10—20 cm 最大,0—10 cm 最小;云杉林土壤 0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm。

表 4 土壤层水文物理性质及蓄水能力

植被类型	土层 深度/cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%			自然	饱和	非毛管
			总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	含水率/%	持水量/mm	持水量/mm
草地	0—10	1.30±0.07a	58.05±2.67a	52.68±2.02a	5.37±0.67a	29.40±7.33a	58.05±2.67a	5.37±0.67a
	10—20	1.21±0.07c	60.67±1.75a	54.57±1.30a	6.10±0.47a	26.60±2.68a	60.67±1.75a	6.10±0.47a
	20—30	1.24±0.06b	62.34±1.96a	56.10±1.47a	6.25±0.51a	19.93±8.13a	62.34±1.96a	6.25±0.51a
灌木林	0—10	0.97±0.09a	60.27±2.37a	53.98±1.91a	6.29±0.56a	31.07±8.61a	60.27±2.37a	6.29±0.56a
	10—20	0.95±0.12a	64.54±2.17a	55.69±2.18a	8.85±0.87a	23.64±6.54b	64.54±2.17a	8.85±0.87a
	20—30	1.00±0.06a	62.68±1.49a	55.81±0.84a	6.87±0.69a	20.71±5.87c	62.68±1.49a	6.87±0.69a
云杉林	0—10	0.82±0.08b	66.16±5.37a	56.56±3.51a	9.60±1.96a	30.96±6.03a	66.16±5.37a	9.60±1.96a
	10—20	0.82±0.07c	64.55±4.50b	55.44±3.10b	9.11±1.44b	25.77±3.62ab	64.55±4.50b	9.11±1.44b
	20—30	0.97±0.04a	63.11±4.51c	54.83±2.97c	8.29±1.60c	22.37±2.54b	63.11±4.51c	8.29±1.60c

2.3.2 土壤层的蓄水能力 由表 4 可知,不同植被类型的土壤自然含水率在垂直方向上均表现为 0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm,即随土壤深度的增加而不断降低;在水平方向上整体表现为云杉林>灌木林>草地,即随海拔高度的上升呈不断提高的趋势。在饱和含水量方面,草地土壤 20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm;灌木林各土壤层次中 10—20 cm 最大为 64.54 mm,0—10 cm 最小;云杉林土壤的饱和含水量随土壤深度的增加而呈不断降低的趋势。草地土壤的非毛管持水量表现为 20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm;灌木林土壤非毛管持水量在 10—20 cm 处最大为 8.85 mm,0—10 cm 最小;云杉林土壤非毛管持水量表现出其随土壤的深度递增而呈下降趋势。不同植被类型 30 cm 深土层的蓄水能力变化存在差异,尤其是云杉林不同层次土壤间存在显著差异( $P<0.05$ ),而整体上表现为云杉林>灌木林>

草地。毛管孔隙度方面,草地、灌木林土壤均表现为 0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm,云杉林土壤则随着土壤深度的增加毛管孔隙度不断下降。草地土壤的非毛管孔隙度表现为 20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm;灌木林土壤非毛管孔隙度在 10—20 cm 最大,0—10 cm 最小;云杉林土壤非毛管孔隙度表现出随土壤深度的增加而不断下降的趋势;整体上,孔隙度各指标均表现为云杉林>灌木林>草地。

草地。

### 2.4 不同植被类型的水源涵养能力

2.4.1 不同植被类型的综合水源涵养能力 由表 5 可知,研究区不同植被类型的综合水源涵养能力有所差异,其中草地植被类型的总持水量最小(181.06 mm),灌木林植被类型的总持水量居中(206.92 mm),云杉林的最大为 237.63 mm。由于植被类型、所处生境及作用层等方面的不同,其水源涵养能力也有所差异。在不同植被类型的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,其水源涵养贡献率在综合水源涵养能力中占比分别为草地土壤的 100%,灌木林的 90.61%,云杉林的 81.56%,而云杉林土壤层的水源涵养能力最大,草地土壤层的最小。灌木林、云杉林的枯枝落叶层与林冠层水源涵养贡献率相对低的多,但仍然是其生态系统中十分重要的部分。

表 5 山地生态系统的水源涵养能力

单位:mm

植被类型	林冠层	枯枝落叶层	30 cm 土壤	总持水量	枯枝落叶层	30 cm 土壤	总有效蓄水量
	截留量	最大持水量	总持水量		有效拦蓄量	有效蓄水量	
草地			181.06	181.06		17.72	17.72
灌木林	14.71	4.72	187.49	206.92	3.52	22.01	40.24
云杉林	17.02	26.81	193.82	237.63	19.32	26.99	63.33

2.4.2 不同植被类型的有效水源涵养能力 不同植被类型的总持水量大小反映的是该植被类型水源涵养功能的大小,与实际的植被生态系统的有效蓄水量大小并不一致。本次野外实测的是单次降雨在不同植被类型中各作用层的分配情况,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

拦蓄量采用最大持水量的 85%与自然持水量的差值来估算<sup>[20]</sup>,以此估算出枯枝落叶层对降水的实际拦蓄量。采用土壤非毛管持水量来衡量研究区不同植被类型的土壤有效蓄水量<sup>[19]</sup>。分析结果显示(表 5),不同植被类型的总有效蓄水量远小于总持水量,前者占比分别为后者的 9.79%(草地),19.45%(灌木

林),26.65%(云杉林),但是,相较于本次实测降雨量来看,除草地的有效水源涵养量稍小于实际降雨量外,灌木林和云杉林均大于实际降雨量,可截留绝大部分的降雨,能够发挥很好的水源涵养功能。

### 3 讨论

植被的水源涵养功能是其水文生态系统的重要组成部分,植被通过植物层、枯枝落叶层和土壤层对降水的截留滞蓄作用影响其区域内水文过程、调节降水再分配、延滞地表径流、增加土壤潜流及地下径流<sup>[19]</sup>。植物层截留降水是植被对降水的初次分配,能够有效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<sup>[21]</sup>。已有研究<sup>[17,22]</sup>表明,植物层截留量的大小受到植被类型、群落结构、郁闭度及降雨量、降雨强度、蒸发速率等因素的综合影响。本研究中,云杉林林冠层截留量大于灌木林,截留率则低于灌木林。这与孙浩等<sup>[17]</sup>对宁夏六盘山的研究结果相一致,而与吴庆贵等<sup>[21]</sup>对涪江流域丘陵区的研究结果不同。主要原因可能是研究区云杉林所处海拔较高,降水间隔时间较短,林间湿度大,加上云杉林叶生物特性的关系,受叶子表面形成的类似于蜡质的膜层阻隔,吸附水分的能力较差,导致云杉林林冠截留率下降;另一方面则由于云杉林冠幅相对较大,且林冠层相较灌木林要厚的多,郁闭度高,接触面大,从而使得截留量较高;另外,降雨量的差异也是造成云杉林林冠截留量大于灌木林的原因。

枯枝落叶层是森林生态系统对降水再分配的第2个作用层,在森林水源涵养过程中扮演着不可或缺的角色。它不仅因其结构疏松,增加地表的粗糙度,产生良好的透水及持水效果,而且通过分解转化增加土壤养分含量,有益于下覆土壤的发育和改良<sup>[19]</sup>。影响枯枝落叶层持水能力大小的因子除枯枝落叶蓄积量以外,还与其树种组成、分解程度、前期持水状况等诸多因素的差异有关<sup>[21]</sup>。研究区3种植被类型中,草地分布海拔低,降水少蒸发强烈,植被稀疏,地上生物量很低,加之距离牧民和游客活动区近,人为干扰和放牧强度大,草地受踩踏影响,枯枝落叶层累积困难。云杉林枯枝落叶不同层次的平均厚度和蓄积量均大于灌木林,这与王会京等<sup>[23]</sup>对太行山不同林型的枯枝落叶层蓄积量研究结果一致。研究区灌木林分布海拔较低,降水少且日照强烈蒸发旺盛,导致其枯枝落叶层蓄积量少且分解程度较低;而云杉林枯枝落叶含油脂高,不易分解导致其未分解层蓄积量大于半分解层。云杉林冠幅大,树龄较高,郁闭度高,从而导致枯枝落叶层的生产量高于灌木林。

枯枝落叶层最大持水量与其类型、组成、蓄积量等关系密切,因而随植被类型、枯枝落叶种类及分解程度、枯枝落叶层蓄积量等而变化<sup>[22]</sup>。研究区云杉林的枯枝落叶层蓄积量高于灌木林,从而使得其总体持水量高于灌木林。最大持水量并非是枯枝落叶层对降雨的实际截留量,有效拦蓄量才是反映枯枝落叶层对一次降雨拦蓄的真实指标,其与枯枝落叶储量、最大持水率、自然含水率等有关<sup>[20]</sup>。研究区云杉林枯枝落叶层有效拦蓄量高于灌木林,主要受其累积厚度及蓄积量大的直接影响。

土壤层是植被生态系统涵养水源的主体,土壤持水功能的强弱直接影响地表径流、土壤潜流和地下水补给等<sup>[21]</sup>。在土壤水文物理特性中,土壤容重和孔隙度直接影响着土壤的通气透水性,是决定林下土壤水源涵养功能的重要因素<sup>[23]</sup>。不同植被类型的土壤层水文物理性质之间存在差异,这与不同植被的枯枝落叶组成、分解程度及地下根系的生长状况存在很大关系<sup>[19]</sup>。研究区不同植被类型不同层次的平均土壤容重中草地最大,灌木林次之,云杉林最小;而孔隙度方面则与之相反,这与韩路等<sup>[13]</sup>对塔里木河上游的研究结果一致。云杉林林下枯枝落叶层深厚,分解程度较好,腐殖质层厚,加上根系发达,林下土壤中孔隙大,透水通气性良好,土质疏松,土壤容重较低。草地植被根系浅,生长环境差,枯枝落叶很难累积保留,土壤养分低,发育较差,土壤孔隙度较小,透水通气性差,土壤紧实程度高,土壤容重高;加之受人类及放牧活动的干扰程度较大,土壤层因牲畜频繁踩踏而导致土壤变得紧实,从而使得土壤容重增大而孔隙度下降。在土层厚度一定时,植被涵养水源的能力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<sup>[19,21]</sup>。云杉林的枯枝落叶层厚度及蓄积量均较高,土壤腐殖质层相对较厚,土壤非毛管孔隙度大,其持水量也相应最大,土壤蓄水能力最强,这一结果与胡健等<sup>[1]</sup>对祁连山排露沟流域的相关研究结果一致。

不同植被的生态系统水源涵养功能的体现主要来源于地上植被截留层、地表枯枝落叶层和土壤层3个作用层。不同植被类型的综合水源涵养能力存在着一定的差异,总持水量越大,表明其涵养水分的能力越强<sup>[3]</sup>。研究区3种植被类型中云杉林的综合水源涵养能力最好,灌木林次之,草地最差,其中土壤层的涵养能力作用最为显著。不同植被类型的有效水源涵养能力远小于综合水源涵养能力,但相较于本次实测降雨量来看,除草地有效水源涵养量稍小于实际降雨量外,灌木林和云杉林均大于实际降雨量,可截

留绝大部分的降雨,表现出很好的水源涵养能力。

另外在本次研究中,草地因植被盖度低,地上生物量很低,草地地表枯枝落叶也受此直接影响及采样时处于植物生长期的原因,仅采集草地土壤层进行了持水能力的测定分析,这对草地植被类型的综合水源涵养能力及有效水源涵养量的评估造成一定的影响。因此,从不同植被类型蓄水保土、涵养水源的角度出发,建议在托木尔峰国家级自然保护区水源涵养功能建设中应首先考虑恢复植被的自然生产力,降低人为干扰程度及放牧载畜量以增强保护区水源涵养功能,尤其是处于生态环境相对更脆弱的低海拔草地分布区,其次保护并进一步科学合理配置空间层次结构发育相对较好的云杉林和灌木林生态系统,这对实现其生态系统水源涵养的生态效益,维持自然保护区生态环境的多样性同样具有重要的生态意义。

## 4 结论

(1)不同植被类型的样地海拔高度及降雨量大小顺序均为云杉林>灌木林>草地,降水量随海拔高度的上升而增加;云杉林穿透降雨量及穿透率均大于灌木林,林冠截留量大于灌木林,截留率则低于灌木林。

(2)灌木林和云杉林的枯枝落叶未分解层平均厚度均大于半分解层,其中灌木林的枯枝落叶未分解层达到半分解层的 4.5 倍。云杉林枯枝落叶层的厚度和蓄积量均大于灌木林,其中未分解层厚度约为灌木林的 2.89 倍,半分解层厚度则高达 9.48 倍;云杉林的枯枝落叶未分解层和半分解层蓄积量约为灌木林的 3.53,8.03 倍。云杉林枯枝落叶层的自然持水率、最大持水率及有效拦蓄量均高于灌木林,二者枯枝落叶半分解层的自然持水率、最大持水率均高于未分解层,有效拦蓄量则相反。其中,不同分解层间的自然持水率差异性明显,灌木林、云杉林的枯枝落叶半分解层分别达到未分解层的 1.82,1.65 倍,而最大持水率在不同分解层间无显著差异。灌木林和云杉林的枯枝落叶未分解层有效拦蓄量分别达到半分解层的 2.67,1.35 倍,这与不同植被类型下枯枝落叶不同层次的蓄积厚度及蓄积量密切相关。

(3)不同植被类型的土壤容重随土壤深度的增加呈现差异性,草地和灌木林土壤容重最小值均出现在 10—20 cm 土层,云杉林出现在表层(0—10 cm),容重最大值为草地表层土壤;只有云杉林土壤容重随土壤深度的增加而呈现增加趋势。不同植被类型的土壤容重整体大小表现为草地>灌木林>云杉林,而孔隙度方面则与之相反。云杉林在总孔隙度、毛管及非毛管孔隙度方面均随着土壤深度的增加不断下降,草地土壤与之相反;灌木林土壤总孔隙度和非毛管孔隙度在 10—20 cm 最大,表层最小。不同植被类型的土

壤自然含水率在垂直方向上均表现出随土壤深度的增加而不断降低的趋势;在水平方向上整体表现为云杉林>灌木林>草地。云杉林土壤的饱和含水量、非毛管持水量随土壤深度递增而呈不断降低的趋势,草地土壤与之相反,灌木林则在 10—20 cm 土层表现最大,分别为 64.54,8.85 mm,表层最小。不同植被类型 30 cm 深土层的蓄水能力变化存在差异,尤其是云杉林不同层次土壤间存在显著差异( $P<0.05$ ),而整体上表现为云杉林>灌木林>草地。

(4)研究区 3 种植被类型中云杉林的综合水源涵养能力最好,灌木林次之,草地最差;土壤层在各水源涵养作用层中作用最为显著,其水源涵养贡献率在综合水源涵养能力中占比分别为草地土壤的 100%,灌木林的 90.61%,云杉林的 81.56%。不同植被类型的有效水源涵养能力远小于综合水源涵养能力,有效水源涵养量分别为综合水源涵养量的 9.79%(草地)、19.45%(灌木林)、26.65%(云杉林)。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [3] 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.
- [4] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in Western Amazonia [J]. Journal of Hydrology, 2000, 237(1): 40-57.
- [5] 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.
- [6] 卢振启,黄秋娟,杨新兵. 河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 112-116.
- [7] Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 363-372.
- [8] 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.
- [9] 李红琴,乔小龙,张懿铨,等. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 195-200.