

# 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响

王玮璐<sup>1,2,3,4</sup>, 贺康宁<sup>1,2,3,4,①</sup>, 张 潭<sup>1,2,3,4</sup>, 王先棒<sup>1,2,3,4</sup>, 张震中<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083;  
3. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083; 4. 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 以华北落叶松 [*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg.]、青杨 (*Populus cathayana* Rehd.)、青海云杉 (*Picea crassifolia* Kom.) 和白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 组成的青海高寒区 6 类水源涵养林为研究对象, 比较了不同类型林分土壤的机械组成、理化性质、饱和导水率和田间持水量的差异, 并采用统计分析方法对影响土壤饱和导水率和田间持水量的主要因子进行分析。结果显示: 6 类水源涵养林土壤的大多数机械组成和理化指标有显著差异, 仅黏粒含量无显著差异。土壤的粉粒含量、总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量、全磷含量、饱和导水率和田间持水量在白桦天然次生阔叶林中均最大, 但在青杨人工阔叶林中均最小; 而土壤的砂粒含量、容重和非毛管孔隙度均在白桦天然次生阔叶林中均最小, 但在青杨人工阔叶林中均最大。表明天然次生阔叶林土壤的水分渗透性和持水能力较强。相关性分析和多元逐步回归分析结果显示: 土壤的砂粒含量和粉粒含量与多数土壤理化指标存在显著或极显著的相关性, 仅黏粒含量与各理化指标均无显著相关性。土壤的饱和导水率和田间持水量与多数土壤机械组成和理化指标存在显著或极显著的相关性, 但土壤饱和导水率与砂粒含量和粉粒含量无显著相关性, 土壤田间持水量与黏粒含量无显著相关性。土壤的毛管孔隙度和有机质含量是影响土壤饱和导水率和田间持水量的主要因子。通径分析结果显示: 土壤毛管孔隙度的直接通径系数大于土壤有机质含量的直接通径系数, 毛管孔隙度的间接通径系数小于其直接通径系数, 而有机质含量的直接通径系数小于其间接通径系数。综合分析结果表明: 在青海高寒区 6 类水源涵养林土壤中, 影响土壤饱和导水率和田间持水量的主要因子是毛管孔隙度和有机质含量, 其中, 毛管孔隙度具有直接影响效应, 而有机质含量则主要通过毛管孔隙度的改变产生间接影响。

**关键词:** 青海高寒区; 水源涵养林; 土壤饱和导水率; 土壤田间持水量; 土壤理化指标

中图分类号: Q948.11; S714.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)02-0069-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.02.08

**Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity** WANG Weilu<sup>1,2,3,4</sup>, HE Kangning<sup>1,2,3,4,①</sup>, ZHANG Tan<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xianbang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Zhenzhong<sup>1,2,3,4</sup> (1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China; 3. Engineering Technology Research Center of Soil and Water Conservation of Beijing, Beijing 100083, China; 4. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing 100083, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(2): 69-77

**Abstract:** Taking six types of water conservation forests composed of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg., *Populus cathayana* Rehd., *Picea crassifolia* Kom. and *Betula platyphylla* Suk.

收稿日期: 2019-03-22

基金项目: 祁连山生态保护与建设综合治理工程科技示范与推广项目(2019-Q-1)

作者简介: 王玮璐(1984—), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事林业生态工程方面的研究。

①通信作者 E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

in cold highland area of Qinghai as research objects, the differences in mechanical components, physical and chemical properties, saturated hydraulic conductivity and field capacity of soil in different types of forests were compared, and the main factors affecting saturated hydraulic conductivity and field capacity were analyzed by statistical analysis method. The results show that there are significant differences in most mechanical components and physical and chemical indexes of soil in six types of water conservation forests, only no significant difference in clay content. Silt content, total porosity, capillary porosity, organic matter content, total nitrogen content, total phosphorus content, saturated hydraulic conductivity and field capacity of soil in natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla* are the largest, but those in artificial broad-leaved forest of *P. cathayana* are the smallest; while sand content, bulk density and non capillary porosity of soil in natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla* are the smallest, but those in artificial broad-leaved forest of *P. cathayana* are the largest. It is indicating that water permeability and water holding capacity of soil in natural secondary broad-leaved forest are stronger. Correlation analysis and multiple stepwise regression analysis results show that there are significant or extremely significant correlations of sand and silt contents of soil with most physical and chemical indexes of soil, only no significant correlation of clay content with each physical and chemical index. There are significant or extremely significant correlations of saturated hydraulic conductivity and field capacity of soil with most mechanical components and physical and chemical indexes of soil, but no significant correlation of saturated hydraulic conductivity of soil with sand and silt contents, that of field capacity of soil with clay content. The capillary porosity and organic matter content of soil are the main factors affecting saturated hydraulic conductivity and field capacity of soil. The result of path analysis shows that direct path coefficient of soil capillary porosity is greater than that of soil organic matter content, indirect path coefficient of capillary porosity is less than its direct path coefficient, and direct path coefficient of organic matter content is less than its indirect path coefficient. The result of comprehensive analysis shows that in six types of water conservation forests in cold highland area of Qinghai, the main factors affecting saturated hydraulic conductivity and field capacity of soil are capillary porosity and organic matter content, in which, capillary porosity has a direct effect, while organic matter content has an indirect effect through the change of capillary porosity.

**Key words:** cold highland area of Qinghai; water conservation forest; soil saturated hydraulic conductivity; soil field capacity; soil physical and chemical indexes

土壤饱和导水率( $K_s$ )是土壤在水饱和状态时,在单位水力梯度下,单位时间内通过单位面积的水量<sup>[1]</sup>。相关研究表明:土壤饱和导水率是反映土壤水分入渗特征和抗侵蚀能力的重要参数之一<sup>[2-5]</sup>,主要受土壤理化性质和水黏度的影响<sup>[6]</sup>,其数值大小对地表径流的产生和发展有影响<sup>[7]</sup>。土壤田间持水量( $W_{fc}$ )是衡量土壤持水能力的一个重要指标<sup>[8]</sup>。许广波等<sup>[9]</sup>的研究结果表明:土壤田间持水量与土壤孔性和有机质含量等土壤性状密切相关。因此,提高土壤饱和导水率和田间持水量可有效减少水土流失并涵养水分。

目前,相关研究主要集中于不同植被类型土壤饱和导水率与田间持水量的差别以及土壤理化性质对二者的影响等方面<sup>[10-13]</sup>。覃淼等<sup>[14]</sup>的研究结果表明:植被类型是土壤饱和导水率和田间持水量的重要影响因子,合理的植被类型可有效改善土壤的水土保持特征。马思文等<sup>[10]</sup>的研究结果表明:三峡库区的

城郊防护林尾端的四面山不同类型人工林的土壤有机质含量与饱和导水率呈二次曲线关系,土壤密度和孔隙度是影响其饱和导水率的最主要因子。许广波等<sup>[9]</sup>利用通径分析方法对土壤田间持水量的主要影响因子进行了研究,认为土壤中粒径小于0.01 mm的黏粒含量是最大田间持水量的直接影响因子,而总孔隙度和有机质含量的共同作用对田间持水量有显著的间接影响。

在西北高寒区,水源涵养林在水资源保护中发挥着重要作用,建设水源涵养林对提高当地的水源涵养能力具有重要意义,但在水源涵养林的建设过程中,目前还未能通过优化森林植被组成达到提高水源涵养能力的目标。作者以青海高寒区6类水源涵养林为研究对象,对各林分土壤的机械组成、理化特征、饱和导水率和田间持水量进行了比较,并分析了土壤的机械组成和理化特征与饱和导水率和田间持水量的相关性,以期明确土壤饱和导水率和田间持水量的影

响因子,为青海高寒区水源涵养林的建设与管理提供基础资料。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省西宁市大通回族土族自治县内的北川河流域,地理坐标为东经  $100^{\circ}52' \sim 101^{\circ}55'$ 、北纬  $36^{\circ}43' \sim 37^{\circ}28'$ ;地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,海拔 2 287~4 581 m,地势西北高、东南低。北川河流域是西宁市重要的水源涵养区,是西宁市的主要饮用水来源。

该区域属于高原大陆性气候,多年平均气温  $3.9^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量 529 mm,全年降水分布不均,降水大多集中在 5 月至 9 月;年均蒸发量 1 763 mm,年均空气相对湿度 56%;最大冻土深度 114 cm,最大积雪厚度 18 cm,无霜期 70~120 d,年均日照时数 2 553 h,最大风速  $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。土壤类型主要为黑钙土、栗钙土和山地棕褐土。

该区域森林植被中主要乔木种类有华北落叶松 [*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (Mayr) Pilg.]、青杨 (*Populus cathayana* Rehd.)、青海云杉 (*Picea*

*crassifolia* Kom.)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 和祁连圆柏 (*Juniperus przewalskii* Kom.) 等,主要灌木种类有沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、杜鹃 (*Rhododendron simsii* Planch.)、金露梅 (*Potentilla fruticosa* Linn.) 和台湾小檗 (*Berberis kawakamii* Hayata) 等,主要草本种类有东方草莓 (*Fragaria orientalis* Losinsk.)、珠芽拳参 (*Polygonum viviparum* Linn.) 和高乌头 (*Aconitum sinomontanum* Nakai) 等。

### 1.2 方法

1.2.1 样地设置 为了避免土壤类型不同以及海拔和地形差异的影响,于 2017 年在华北落叶松人工针叶林 (Lgp, 简称华北落叶松林)、青海云杉人工针叶林 (Pic, 简称青海云杉林)、青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林 (Pic+Lgp, 简称青海云杉+华北落叶松混交林)、青海云杉+白桦人工针叶林与天然次生阔叶林混交林 (Pic+Bep, 简称青海云杉+白桦混交林)、白桦天然次生阔叶林 (Bep, 简称白桦林) 和青杨人工阔叶林 (Poc, 简称青杨林) 6 类典型水源涵养林内,分别选择土壤类型(山地棕褐土)、海拔、坡度和坡向等基本一致的代表性样地 3 个,面积均为  $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,共 18 个样地。供试 6 类水源涵养林的基本概况见表 1。

表 1 青海高寒区供试 6 类水源涵养林的基本概况

Table 1 Basic status of six types of water conservation forests tested in cold highland area of Qinghai

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Aspect	郁闭度 Canopy density	林龄/a Stand age	枯落物储量/(t·hm <sup>-2</sup> ) Litter reserves
Lgp	2 844	14	270	0.55	32	35.3
Pic	2 852	15	296	0.62	33	7.4
Pic+Lgp	2 862	28	302	0.68	32-33	23.3
Pic+Bep	2 862	31	300	0.63	7-69	31.5
Bep	2 860	24	0	0.66	7-87	37.0
Poc	2 762	12	65	0.65	24	5.0

<sup>1)</sup> Lgp: 华北落叶松人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic: 青海云杉人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Picea crassifolia*; Pic+Lgp: 青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林 Artificial coniferous mixed forest of *P. crassifolia*+*L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic+Bep: 青海云杉+白桦人工针叶林与天然次生阔叶林混交林 Mixed forest of artificial coniferous forest and natural secondary broad-leaved forest of *P. crassifolia*+*Betula platyphylla*; Bep: 白桦天然次生阔叶林 Natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla*; Poc: 青杨人工阔叶林 Artificial broad-leaved forest of *Populus cathayana*.

1.2.2 样品采集 2017 年 7 月至 8 月,在每个样地的上坡、中坡和下坡各布置 1 个土壤采样点。使用普通环刀在 0~20 cm 土壤中采集 3 个土壤样品,用于土壤容重和田间持水量测定;于同一采样点,使用 TWS-55 型土壤渗透仪的专用环刀采集 3 个土壤样品,用于土壤饱和导水率测定;另于同一采样点采集 3 个土壤样品,装入自封袋内,用于土壤机械组成(包

括砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量)以及有机质含量、全氮含量和全磷含量测定。

1.2.3 各指标的测定方法 采用恒定水头法<sup>[15]</sup>测定土壤的饱和导水率,并按照公式“ $K_{st} = QL/ATh$ ”计算饱和导水率,式中, $K_{st}$ 为  $t^{\circ}\text{C}$  下的饱和导水率, $Q$  为测定时间内的出水量, $L$  为专用环刀中的土壤厚度, $A$  为专用环刀的横截面面积, $T$  为测定时间, $h$  为水头

差。由于温度对水粘度有影响,进而影响饱和导水率,因此,按照公式“ $K_{s10} = K_{st} / (0.7 + 0.03t)$ ”将  $K_{st}$  统一换算成 10 °C 水温下的饱和导水率  $K_{s10}$  [16], 式中,  $t$  为测定时的水温。

采用环刀法 [17] 测定土壤容重 ( $\rho_b$ ), 并按照公式“ $P_t = (1 - \rho_b / \rho_s) \times 100\%$ ”计算土壤总孔隙度 ( $P_t$ ), 其中, 土壤密度 ( $\rho_s$ ) 设置为  $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 采用环刀浸水法 [11, 17] 测定土壤的田间持水量 ( $W_{fc}$ ) 和毛管孔隙度 ( $P_c$ ); 非毛管孔隙度 ( $P_n$ ) 为总孔隙度与毛管孔隙度的差值 [17]。参照文献 [18], 并使用 Mastersizer 3000 激光粒度仪 (英国 Malvern Panalytical 公司) 测定土壤的砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量。采用重铬酸钾容量法-稀释热法 [19] 测定土壤的有机质 (OM) 含量; 参照文献 [20], 并使用 SmartChem 200 全自动化学分析仪 (法国 Alliance 公司) 测定土壤的全氮 (TN) 含量和全磷 (TP) 含量。

采用华孟分级法 [21] 将土壤饱和导水率 ( $K_{st}$ ) 分成 5 个等级: 很小 ( $K_{st} < 0.042 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )、低 ( $0.042 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq K_{st} < 0.111 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )、中 ( $0.111 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq K_{st} < 0.278 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )、高 ( $0.278 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq K_{st} < 0.694 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 和很高 ( $K_{st} \geq 0.694 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )。参照美国农业部提出的 USDA 制 [22], 按照粒径 ( $d$ ) 将土壤颗粒分成 3 类: 砂粒 ( $0.050 \text{ mm} \leq d < 2.000 \text{ mm}$ )、粉粒 ( $0.002 \text{ mm} \leq d < 0.050 \text{ mm}$ ) 和黏粒 ( $d < 0.002 \text{ mm}$ )。

### 1.3 数据处理和分析

采用 EXCEL 2010 软件对获得的实验数据进行统计分析和绘图。采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析, 并对土壤的饱和导水率和田间持水量与其他因子进行 Pearson 相关性分析、多元逐步回归分析和通径分析。

由于土壤机械组成与其理化指标相互影响, 因此, 采用 Pearson 相关性分析不能准确反映这些指标与饱和导水率和田间持水量的关系 [17]。为筛选出土壤饱和导水率和田间持水量的主要影响因子, 分别以饱和导水率和田间持水量为因变量, 以容重 ( $X_1$ )、总孔隙度 ( $X_2$ )、毛管孔隙度 ( $X_3$ )、非毛管孔隙度 ( $X_4$ )、有机质含量 ( $X_5$ )、全氮含量 ( $X_6$ )、全磷含量 ( $X_7$ )、砂粒含量 ( $X_8$ )、粉粒含量 ( $X_9$ ) 和黏粒含量 ( $X_{10}$ ) 为自变量进行多元逐步回归分析, 建立多元线性方程。根据多元逐步回归分析结果筛选出土壤饱和导水率和田间持水量的主要影响因子, 并进一步进行通径分析, 明确各因子的影响程度。

## 2 结果和分析

### 2.1 土壤机械组成和理化指标的比较及相关性分析

2.1.1 土壤机械组成和理化指标的比较 青海高寒区 6 类水源涵养林土壤机械组成和理化指标的比较见表 2。

从土壤机械组成可以看出: 各水源涵养林土壤的砂粒含量和粉粒含量差异较大, 而黏粒含量仅有小幅差异。其中, 青杨林土壤的砂粒含量最大 (51.12%), 粉粒含量最小 (23.95%); 白桦林土壤的粉粒含量最大 (39.89%), 砂粒含量最小 (32.71%)。方差分析结果显示: 青杨林、青海云杉林和青海云杉+华北落叶松混交林的土壤砂粒含量显著 ( $P < 0.05$ ) 高于华北落叶松林、青海云杉+白桦混交林和白桦林; 白桦林和青海云杉+白桦混交林的土壤粉粒含量显著高于青海云杉林、青海云杉+华北落叶松混交林和青杨林, 青海云杉+白桦混交林的土壤粉粒含量也显著高于青杨林; 各水源涵养林的土壤黏粒含量无显著 ( $P > 0.05$ ) 差异。说明各水源涵养林仅对土壤的砂粒含量和粉粒含量有

表 2 青海高寒区 6 类水源涵养林土壤机械组成和理化指标的比较 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison on mechanical components and physical and chemical indexes of soil in six types of water conservation forests in cold highland area of Qinghai ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

林分 <sup>2)</sup> Stand <sup>2)</sup>	土壤机械组成含量/% Content of soil mechanical components			容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) Bulk density	总孔隙度/% Total porosity
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay		
Lgp	38.25±2.59b	38.41±2.05a	23.34±3.04a	0.57±0.06bc	78.61±2.25ab
Pic	49.58±3.54a	28.78±3.11bc	21.64±1.73a	0.63±0.02b	76.07±0.63b
Pic+Lgp	47.66±3.05a	28.12±4.06bc	24.22±0.74a	0.61±0.04bc	76.91±1.46ab
Pic+Bep	37.13±4.18b	36.93±3.88ab	25.94±1.50a	0.61±0.08bc	77.13±2.95ab
Bep	32.71±0.87b	39.89±2.01a	27.40±2.48a	0.48±0.03c	82.01±1.29a
Poc	51.12±1.29a	23.95±2.97c	24.93±2.51a	0.80±0.02a	69.95±0.56c



续表2 Table 2 (Continued)

林分 <sup>2)</sup> Stand <sup>2)</sup>	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non capillary porosity	有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Organic matter content	全氮含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total nitrogen content	全磷含量/(g·kg <sup>-1</sup> ) Total phosphorus content
Lgp	62.05±3.06ab	16.57±0.88ab	151.33±19.83ab	12.81±1.47ab	0.78±0.06ab
Pic	57.78±0.35bc	18.30±0.83a	102.61±4.13bc	8.18±0.63bc	0.65±0.01b
Pic+Lgp	60.08±2.79ab	16.83±1.64ab	126.11±9.23bc	8.40±0.88bc	0.70±0.02b
Pic+Bep	62.26±1.66ab	14.86±1.30b	142.16±12.98bc	10.29±1.81abc	0.75±0.05ab
Bep	72.64±1.38a	9.37±0.34b	157.07±20.11a	13.98±2.05a	0.95±0.08a
Poc	50.67±2.20c	19.28±1.94a	99.74±4.01c	7.74±0.36c	0.61±0.05c

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference.

<sup>2)</sup> Lgp: 华北落叶松人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic: 青海云杉人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Picea crassifoliata*; Pic+Lgp: 青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林 Artificial coniferous mixed forest of *P. crassifolia*+*L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic+Bep: 青海云杉+白桦人工针叶林与天然次生阔叶林混交林 Mixed forest of artificial coniferous forest and natural secondary broad-leaved forest of *P. crassifolia*+*Betula platyphylla*; Bep: 白桦天然次生阔叶林 Natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla*; Poc: 青杨人工阔叶林 Artificial broad-leaved forest of *Populus cathayana*.

一定影响。

从土壤理化指标可以看出:在各水源涵养林中,青杨林土壤的容重和非毛管孔隙度均最大,而其总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量均最小;白桦林土壤的容重和非毛管孔隙度均最小,而其总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量均最大。方差分析结果显示:部分水源涵养林土壤的容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量存在显著差异,且这些指标在白桦林与青杨林间均存在显著差异。说明各水源涵养林对土壤理化性质有不同程度的影响。

2.1.2 土壤机械组成与理化指标的相关性分析 青海高寒区 6 类水源涵养林土壤机械组成与理化指标的 Pearson 相关系数见表 3。

由表 3 可见:砂粒含量与容重和非毛管孔隙度呈显著正相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量呈显著或极显著 ( $P<0.01$ ) 负相关;粉粒含量与容重呈极显著负相关,与非毛管孔隙度呈不显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量呈极显著正相关;黏粒含量与各理化指标均无显著相关性。说明各类水源涵养林土壤的砂粒含量和粉粒含量对土壤理化性质有显著影响。

表 3 青海高寒区 6 类水源涵养林土壤机械组成与理化指标间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>Table 3 Pearson correlation coefficients of mechanical components with physical and chemical indexes of soil in six types of water conservation forests in cold highland area of Qinghai<sup>1)</sup>

土壤机械组成 Soil mechanical component	与各理化指标的相关系数 Correlation coefficient with each physical and chemical index						
	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non capillary porosity	有机质含量 Organic matter content	全氮含量 Total nitrogen content	全磷含量 Total phosphorus content
砂粒含量 Sand content	0.474*	-0.473*	-0.596**	0.565*	-0.496*	-0.482*	-0.573*
粉粒含量 Silt content	-0.682**	0.682**	0.642**	-0.321	0.621**	0.703**	0.643**
黏粒含量 Clay content	-0.234	0.234	0.206	-0.078	0.301	0.356	0.245

<sup>1)</sup> \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ .

## 2.2 土壤饱和导水率的差异及其影响因子的统计分析

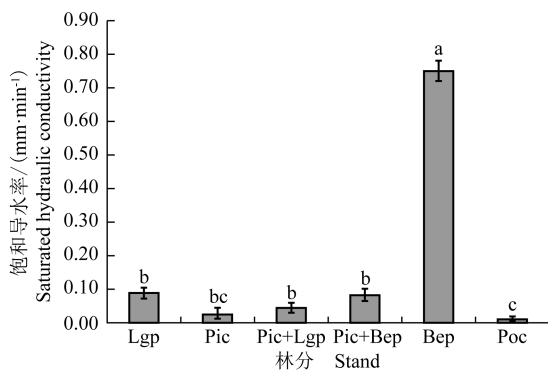
2.2.1 土壤饱和导水率的差异分析 青海高寒区 6 类水源涵养林的土壤饱和导水率差异见图 1。由图 1 可见:在各类水源涵养林中,白桦林的土壤饱和导水率最大,达到  $0.748 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;华北落叶松林、青海云杉+白桦混交林和青海云杉+华北落叶松混交林

的土壤饱和导水率也较大,分别为  $0.089$ 、 $0.084$  和  $0.045 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;青海云杉林和青杨林的土壤饱和导水率均较小,分别为  $0.024$  和  $0.010 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

方差分析结果显示:白桦林的土壤饱和导水率显著 ( $P<0.05$ ) 高于其他 5 类林分;华北落叶松林、青海云杉+华北落叶松混交林和青海云杉+白桦混交林的土壤饱和导水率也显著高于青杨林。说明各水源涵

养林对土壤饱和和导水率有不同程度的影响。

**2.2.2 土壤饱和和导水率影响因子的统计分析** 对青海高寒区6类水源涵养林的土壤饱和和导水率与土壤机械组成和理化指标进行 Pearson 相关性分析。结果显示:土壤饱和和导水率与土壤的砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量的相关系数分别为-0.413、0.417、0.478、-0.965、0.965、0.977、-0.490、0.924、0.821 和 0.739,其中,饱和和导水率与容重呈极显著( $P<0.01$ )负相关,与非毛管孔隙度呈显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量呈极显著正相关,与黏粒含量呈显著正相关,但与砂粒含量和粉粒含量无显著( $P>0.05$ )相关性。说明各土壤机械组成和理化指标与土壤饱和和导水率有不同程度的相关性。



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference.

Lgp: 华北落叶松人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic: 青海云杉人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Picea crassifolia*; Pic+Lgp: 青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林 Artificial coniferous mixed forest of *P. crassifolia*+*L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic+Bep: 青海云杉+白桦人工针叶林与自然次生阔叶林混交林 Mixed forest of artificial coniferous forest and natural secondary broad-leaved forest of *P. crassifolia*+*Betula platyphylla*; Bep: 白桦天然次生阔叶林 Natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla*; Poc: 青杨人工阔叶林 Artificial broad-leaved forest of *Populus cathayana*.

图1 青海高寒区6类水源涵养林土壤饱和和导水率的差异  
Fig. 1 Difference in saturated hydraulic conductivity of soil in six types of water conservation forests in cold highland area of Qinghai

多元逐步回归分析结果显示:毛管孔隙度和有机质含量是影响土壤饱和和导水率的主要因子,土壤饱和和导水率( $K_{s10}$ )与毛管孔隙度( $X_3$ )和有机质含量( $X_5$ )显著( $\alpha=0.05$ )相关,多元线性方程为  $K_{s10} = -5.095 + 0.030X_3 + 0.016X_5$  ( $R^2 = 0.972$ )。

为判断毛管孔隙度和有机质含量对土壤饱和和导水率的影响程度,进一步进行了通径分析(表4)。结果显示:剩余通径系数为0.167, Durbin-Watson 统计量为2.732,说明对土壤饱和和导水率有影响的自变量已被纳入多元线性方程中,且多元线性方程的残差独立。毛管孔隙度的直接通径系数大于有机质含量的直接通径系数,说明毛管孔隙度对土壤饱和和导水率的直接正效应更强,是影响土壤饱和和导水率的主导因子;毛管孔隙度的间接通径系数为0.243,小于其直接通径系数,说明毛管孔隙度可通过改变有机质含量间接对土壤饱和和导水率产生一定的正效应,但这种间接效应弱于直接效应。有机质含量的直接通径系数小于其间接通径系数,说明有机质含量可通过毛管孔隙度的改变对土壤饱和和导水率间接产生一定的正效应,且这种间接效应强于直接效应。

综上所述,在供试6类水源涵养林的土壤中,毛管孔隙度是影响土壤饱和和导水率的直接主导因子,而有机质含量则主要通过毛管孔隙度的改变对土壤饱和和导水率产生间接影响。

表4 青海高寒区水源涵养林土壤毛管孔隙度和有机质含量与饱和和导水率间的通径系数<sup>1)</sup>  
Table 4 Path coefficients of capillary porosity and organic matter content with saturated hydraulic conductivity of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai<sup>1)</sup>

指标 Index	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient		
		$P_c \rightarrow K_{s10}$	$C_{OM} \rightarrow K_{s10}$	总计 Total
$P_c$	0.734	—	0.243	0.243
$C_{OM}$	0.275	0.649	—	0.649

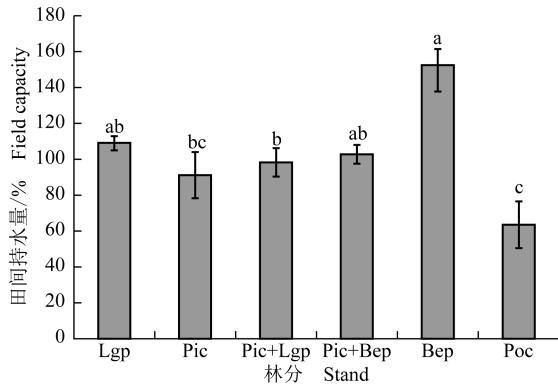
<sup>1)</sup>  $P_c$ : 毛管孔隙度 Capillary porosity;  $C_{OM}$ : 有机质含量 Organic matter content;  $K_{s10}$ : 饱和和导水率 Saturated hydraulic conductivity.  $\rightarrow$ : 作用方向 Direction of action. —: 无数据 No datum.

## 2.3 土壤田间持水量的差异及其影响因子的统计分析

**2.3.1 土壤田间持水量的差异分析** 青海高寒区6类水源涵养林的土壤田间持水量差异见图2。由图2可见:在各水源涵养林中,白桦林的土壤田间持水量最大,达到152.3%;华北落叶松林的土壤田间持水量也较大,为109.5%;青杨林的土壤田间持水量最小,仅为63.6%。

方差分析结果显示:白桦林的土壤田间持水量显著( $P<0.05$ )大于青海云杉林、青海云杉+华北落叶松混交林和青杨林;华北落叶松林、青海云杉+华北落

叶松混交林和青海云杉+白桦混交林的土壤田间持水量显著大于青杨林。说明各水源涵养林对土壤田间持水量有不同程度的影响。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference.

Lgp: 华北落叶松人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic: 青海云杉人工针叶林 Artificial coniferous forest of *Picea crassifolia*; Pic+Lgp: 青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林 Artificial coniferous mixed forest of *P. crassifolia*+*L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; Pic+Bep: 青海云杉+白桦人工针叶林与天然次生阔叶林混交林 Mixed forest of artificial coniferous forest and natural secondary broad-leaved forest of *P. crassifolia*+*Betula platyphylla*; Bep: 白桦天然次生阔叶林 Natural secondary broad-leaved forest of *B. platyphylla*; Poc: 青杨人工阔叶林 Artificial broad-leaved forest of *Populus cathayana*.

图2 青海高寒区6类水源涵养林土壤田间持水量的差异  
Fig. 2 Difference in field capacity of soil in six types of water conservation forests in the cold highland area of Qinghai

2.3.2 土壤田间持水量影响因子的统计分析 对青海高寒区6类水源涵养林的土壤田间持水量与土壤机械组成和理化指标进行 Pearson 相关性分析。结果显示:土壤田间持水量与土壤的砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、全氮含量和全磷含量的相关系数分别为-0.529、0.678、0.280、-0.970、0.970、0.979、-0.523、0.942、0.867 和 0.854,其中,土壤田间持水量与土壤容重呈极显著 ( $P < 0.01$ ) 负相关,与非毛管孔隙度和砂粒含量呈显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度、有机质含量和粉粒含量呈极显著正相关,与全氮含量和全磷含量呈显著正相关。说明各土壤机械组成和理化指标与土壤田间持水量有不同程度的相关性。

多元逐步回归分析结果显示:毛管孔隙度和有机质含量是影响土壤田间持水量的主要因子,土壤田间持水量 ( $W_{fc}$ ) 与毛管孔隙度 ( $X_3$ ) 和有机质含量 ( $X_5$ )

显著 ( $\alpha = 0.05$ ) 相关,多元线性方程为  $W_{fc} = -87.444 + 1.782X_3 + 0.642X_5$  ( $R^2 = 0.980$ )。

为判断毛管孔隙度和有机质含量对土壤田间持水量的影响程度,进一步进行了通径分析(表5)。结果显示:剩余通径系数为 0.141, Durbin-Watson 统计量为 2.111,说明对土壤田间持水量有影响的自变量已被纳入多元线性方程中,且多元线性方程残差独立。毛管孔隙度的直接通径系数大于有机质含量的直接通径系数,说明毛管孔隙度对田间持水量的直接正效应更强,是影响土壤田间持水量的主导因子;毛管孔隙度的间接通径系数为 0.318,小于其直接通径系数,说明毛管孔隙度可通过改变有机质含量对土壤田间持水量间接产生一定的正效应,但这种间接效应弱于直接效应。有机质含量的直接通径系数略小于其间接通径系数,说明有机质含量可通过毛管孔隙度的改变对土壤田间持水量间接产生一定的正效应,且这种间接效应略强于直接效应。

综上所述,在供试6类水源涵养林的土壤中,毛管孔隙度是影响土壤田间持水量的直接主导因子,而有机质含量则主要通过毛管孔隙度的改变对土壤田间持水量产生间接影响。

表5 青海高寒区水源涵养林土壤毛管孔隙度和有机质含量与田间持水量的通径系数<sup>1)</sup>

Table 5 Path coefficients of capillary porosity and organic matter content with field capacity of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai<sup>1)</sup>

指标 Index	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient		
		$P_c \rightarrow W_{fc}$	$C_{OM} \rightarrow W_{fc}$	总计 Total
$P_c$	0.661	—	0.318	0.318
$C_{OM}$	0.360	0.582	—	0.582

<sup>1)</sup>  $P_c$ : 毛管孔隙度 Capillary porosity;  $C_{OM}$ : 有机质含量 Organic matter content;  $W_{fc}$ : 田间持水量 Field capacity.  $\rightarrow$ : 作用方向 Direction of action. —: 无数据 No datum.

### 3 讨论和结论

上述研究结果显示:供试6类水源涵养林的土壤饱和导水率有明显差异,根据华孟分级法<sup>[21]</sup>可推断其土壤水分渗透性。其中,白桦林的土壤饱和导水率大于  $0.694 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,表明其水分渗透性很高,能有效减少地表径流,增加土壤持水量;华北落叶松林、青海云杉+白桦混交林和青海云杉+华北落叶松混交林的土壤饱和导水率为  $0.042 \sim 0.111 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,表明



这些林分土壤的水分渗透性较低;青海云杉林和青杨林的土壤饱和导水率均小于  $0.042 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,表明这2类林分土壤的水分渗透性很低。

相关性分析结果显示:在供试6类水源涵养林土壤中,砂粒含量和粉粒含量与其理化指标存在显著或极显著的相关性,但黏粒含量与各理化指标均无显著相关性,说明土壤中的砂粒含量和粉粒含量是影响其理化性质的2个重要因子。供试6类水源涵养林土壤的饱和导水率和田间持水量与容重呈极显著负相关,这是因为随容重增大,土壤更加紧密坚实且孔隙减少,土壤内部的连通性变差,水分在土壤内流动时受到的阻力增大,导致水流量减少,因而使土壤的田间持水量和饱和导水率相应降低<sup>[23]</sup>。王贤等<sup>[23]</sup>认为,土壤饱和导水率与非毛管孔隙度呈极显著正相关,但与黏粒含量无显著相关性;付同刚等<sup>[24]</sup>等则认为,土壤饱和导水率与毛管孔隙度呈极显著负相关,与非毛管孔隙度无显著相关性;而本研究结果显示:土壤饱和导水率与毛管孔隙度呈极显著正相关,与非毛管孔隙度呈显著负相关,导致土壤饱和导水率与其理化性质相关性不一致的原因可能与研究区域的植被类型、土地利用类型以及土壤的结构和理化性质的不同有关。

在青海高寒区6类水源涵养林土壤的机械组成和理化指标中,有机质含量和毛管孔隙度是影响饱和导水率与田间持水量的主导因子,但二者的作用效应不同,其中,毛管孔隙度对土壤的饱和导水率和田间持水量有直接影响效应,而有机质含量则主要通过毛管孔隙度的改变对土壤的饱和导水率和田间持水量产生间接影响。毛管孔隙是土壤孔隙的主要组成部分,在很大程度上反映了土壤的通气性和透水性,随毛管孔隙度的增大,土壤颗粒越来越疏松,土壤内部毛管孔隙的连通性也随之增大,使土壤中水分流动的阻力减小,因此,土壤的饱和导水率与田间持水量均相应提高。本研究结果显示:毛管孔隙的作用效应大于非毛管孔隙,这可能与本研究区内林地土壤中的石砾使非毛管孔隙的连通性变差,导致水分垂直下移速度降低有关。相关研究结果表明:土壤有机质是土壤中动物的食物来源之一,其含量与土壤中动物数量呈明显的正相关关系<sup>[25-26]</sup>。因而,土壤有机质含量的提高可使土壤中动物数量增加,而动物在土壤中的活动可使土壤粉粒含量升高、容重减小、毛管孔隙度增加,进而改善土壤结构,并相应提高土壤的水分渗透

能力;另外,有机质还可通过促进土壤颗粒形成水稳性团聚体<sup>[27]</sup>来增强土壤的持水性能、改善土壤的胶体状况,使土壤的水分吸附作用增强<sup>[28]</sup>,因而,有机质含量提高可间接使土壤的饱和导水率和田间持水量升高。

不同地区土壤的饱和导水率与田间持水量会随土壤特征的变化而改变。在同一区域内,不同类型的植被也因根系活动、枯落物输入和分解等方式造成土壤特征的改变,进而有差别地对土壤的饱和导水率和田间持水量产生影响<sup>[17]</sup>。本研究中,白桦天然次生阔叶林土壤的水分渗透性与持水能力均大于人工针叶林(华北落叶松林和青海云杉林)、青海云杉+华北落叶松人工针叶混交林、青海云杉+白桦人工针叶林与天然次生阔叶林混交林和青杨人工阔叶林。由于天然次生阔叶林林下的枯落物现存量和灌草覆盖度大、枯落物腐化速率快,导致土壤中有有机质含量和土壤疏松度增加,加之人为干扰较少,故其土壤的水分渗透性和持水能力更强。人工阔叶林的水分渗透性和持水能力均最差,可能与其林下枯枝物较少,土壤的有机质含量和毛管孔隙度较低有关。北川河流域地处半干旱地区,降水量小于蒸发量,提高该流域内土壤的饱和导水率与田间持水量有利于充分利用当地有限的降水资源,促进地表水分下渗,减少地表径流,增加土壤储水量,对水源涵养具有重要意义。在北川河流域内,与其他水源涵养林相比,天然次生阔叶林土壤的贮水能力更强,能够充分发挥涵养水源的作用,因而,如果能够扩大封山育林面积,尽可能恢复天然林,将明显增强北川河流域土壤的水源涵养功能,也有利于该流域生态景观的优化。

综上所述,在青海高寒区水源涵养林的土壤中,毛管孔隙度和有机质含量是影响土壤饱和导水率和田间持水量的主要因子,其中,毛管孔隙度对土壤的饱和导水率和田间持水量有直接影响,而有机质含量主要通过毛管孔隙度的改变对土壤的饱和导水率和田间持水量产生间接影响。在青海高寒区,天然次生阔叶林土壤具有更好的水分渗透性和持水能力,因而保护与恢复天然次生阔叶林是改善当地水源涵养状况的重要途径之一。本研究中,作者仅对青海高寒区典型水源涵养林土壤的饱和导水率和田间持水量特征及其影响因子进行了初步分析,并没有考虑地形和林龄的影响效应,因此,还有待进一步深入细致的研究。



## 参考文献:

- [1] 闫升,牛健植,方梓行,等. 鹫峰地区不同海拔表层土壤性质及饱和导水率研究[J]. 北京农业, 2016(6): 225-228.
- [2] FODOR N, SÁNDOR R, ORFANUS T, et al. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity [J]. Geoderma, 2011, 165: 60-68.
- [3] WANG T, ISTANBULLUOGLU E, WEDIN D, et al. Impacts of revegetation on the temporal evolution of soil saturated hydraulic conductivity in a vegetated sand dune area[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73: 7651-7660.
- [4] 牛海山,李香真,陈佐忠. 放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 211-216.
- [5] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.
- [6] 于德芬,徐福安. 介绍一种土壤饱和导水率测定仪[J]. 土壤, 1990(2): 103-106.
- [7] WOOLHISER D A, SMITH R E, GIRALDEZ J-V. Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow[J]. Water Resource Research, 1996, 32(3): 671-678.
- [8] 杨欣坤,王宇,赵兰坡,等. 土壤水动力学参数及其影响因素研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 38-43.
- [9] 许广波,吕龙石,廉浩燮,等. 影响田间持水量主要因子的通径分析[J]. 延边大学学报, 1997, 19(4): 242-245.
- [10] 马思文,张洪江,程金花,等. 三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(5): 99-106.
- [11] 李劲彬. 黄土高原不同种植类型下土壤容重及田间持水量影响研究[J]. 农业与技术, 2018, 38(5): 1-2.
- [12] 刘玲,刘永忠. 莱芜市红石公园土壤结构特征及其与饱和导水率的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 188-192.
- [13] 赵秀兰. 影响测定田间持水量的因素及其订正[J]. 黑龙江气象, 2001(1): 41-44.
- [14] 覃森,翟禄新,周正朝. 桂北地区土地利用类型对土壤饱和导水率和持水能力的影响研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 28-32.
- [15] 陈效民,潘根兴,王德建,等. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-12, 59.
- [16] 刘宇,张洪江,张友焱,等. 晋西黄土丘陵区主要人工林土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 131-135.
- [17] 彭舜磊,由文辉,沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 78-84.
- [18] 冯瑞,郭月峰,张霞,等. 敖汉旗两种主要土壤类型的土壤机械组成[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 100-103.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 34-35.
- [20] 陈剑磊,谢文霞,崔育倩,等. SmartChem140全自动化学分析仪测定土壤全氮全磷的研究[J]. 分析科学学报, 2016, 32(1): 84-88.
- [21] 华孟,王坚. 土壤物理学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 280-290.
- [22] 孙佳佳,王培,王志刚,等. 不同成土母质及土地利用对红壤机械组成的影响[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 54-58.
- [23] 王贤,张洪江,程金花,等. 重庆市四面山典型林分土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 29-34.
- [24] 付同刚,陈洪松,王克林. 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 538-546.
- [25] 铁烈华,白文玉,冯茂松,等. 柏木低效林5种改造措施对土壤动物和土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1053-1060.
- [26] 黄秋娟,卜志国,侯晓杰,等. 保定市不同绿地土壤动物群落与土壤理化性质的关系[J]. 河北林果研究, 2009, 24(2): 195-199.
- [27] 张耀方,赵世伟,王子龙,等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 145-150.
- [28] 梁向锋,赵世伟,张扬,等. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 636-642.

(责任编辑:郭严冬)