

六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究

徐丽宏, 王彦辉, 熊 伟, 于澎湃

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要:通过对土壤的水文物理性质、持水能力及渗透性的测定,分析了宁夏六盘山南坡典型森林植被类型的持水性能和渗透能力。结果表明,六盘山典型植被的最大贮水能力486.5~604.8 mm,有效贮水能力61.0~292.1 mm,砾石体积含量的大小是影响土壤有效贮水能力的关键因素。典型植被土壤表层(0~10 cm)的初始入渗速率4.00~24.99 mm·min⁻¹,稳定渗透速率1.18~15.17 mm·min⁻¹。利用Kostiakov方程、Horton方程和Philip方程模拟了土壤渗透过程,表明Horton方程是较好的模拟形式,土壤非毛管孔隙度对土壤水分渗透起到关键作用,而砾石含量是通过影响土壤非毛管孔隙度而影响土壤水分渗透作用。

关键词:土壤水文物理;持水能力;渗透性;砾石;六盘山

中图分类号:S715

文献标识码:A

Soil Hydrological Properties of Typical Vegetation in Liupan Mountains

XU Li-hong, WANG Yan-hui, XIONG Wei, YU Peng-tao

(Key Laboratory of Forest Ecological Environment of State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Based on soil hydro-physical properties, water holding capacity and infiltration, the water holding capacity and infiltration of typical vegetations were analyzed on the south slope of Liupan Mountains in Ningxia Hui Autonomous Region. The results indicated that the maximum water storage capacity ranged from 486.5 mm to 604.8 mm and the effective storage capacity ranged from 61.0 mm to 292.1 mm. The effective storage capacity of 0~100 cm soil layer was affected by the volumetric content of rock fragments. The initial infiltration rate of soil surface (0~10 cm) ranged from 4.00 mm·min⁻¹ to 24.99 mm·min⁻¹ and the steady infiltration rate ranged from 1.18 mm·min⁻¹ to 15.17 mm·min⁻¹. Simulations of the soil water infiltration using the Kostiakov equation, Horton equation and Philip equation showed the result using the Horton equation was the best. It also showed that the soil non-capillary porosity played a key role on the soil water infiltration and the volumetric content of rock fragments might affect the soil water infiltration through affecting the content of soil non-capillary porosity.

Key words: soil hydrological properties; water retaining capacity; infiltration; rock fragments; Liupan Mountains

宁夏六盘山位于我国半湿润区向半干旱区的过渡带上,生态环境脆弱,是我国生态植被恢复的关键地带。由于长期以来对森林植被的破坏,该区水土流失严重,水资源缺乏,恢复森林植被对保持水土、涵养水源、改善生态环境等具有重要意义。林地土壤的水

文特征是森林生态系统水分循环中林分结构与功能的综合体现^[1],土壤层的持水贮水能力主要与土壤密度、孔隙度等物理性质及土层厚度有关^[2-4],而且土壤水分也是水文循环的一个重要部分。土壤入渗是水文循环的一个重要环节,渗透速率是极重要的土壤

收稿日期:2011-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(40801017, 40730631)、林业公益性行业科研专项(200904056, 200904005)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2010001-02)和国家林业局森林生态环境重点实验室项目资助。

作者简介:徐丽宏(1975—),女,博士,助理研究员。主要从事景观生态与生态水文学研究, E-mail: xulihong2000@163.com

水文物理特征参数,它不但影响降水进入土壤的速率和数量,同时还关系到地表径流的产生和流域产流量的大小^[5]。土壤的渗透性常常受土壤的孔隙状况、质地、结构、土壤有无裂隙、土表有无结皮等因素的影响^[6-7],并与植被对土壤的作用有关。本文研究宁夏六盘山主要植被类型的土壤贮水能力、土壤水分渗透特征及其影响因素,试图为流域分布式水文模型的建立提供土壤物理特征参数以及水源涵养林建设与植被恢复提供一定的科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于六盘山自然保护区的香水河小流域,地处黄土高原的中西部,宁夏回族自治区南端,是黄河的支流泾河的源头,海拔2 060~2 931 m,地理坐标为106°09′~106°30′ E、35°15′~35°41′ N,属暖温带半湿润区向半干旱区的过渡带,大陆性季风气候。年平均温度5.8℃,最热月(7月)平均气温17.4℃,最冷月(1月)平均气温-7.0℃;年均降水

量为591.6 mm,多集中于6—9月份。香水河小流域植被保存完好,垂直带谱明显,覆盖度为70%~80%,植被主要以天然次生林为主,如山杨(*Populus davidiana* Dode)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burk.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)、华山松(*Pinus armandi* Franch.)、少脉槲(*Tilia paucicostata* Maxim.)等,人工林主要是华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.);在山体阳坡还分布着大量灌丛,高海拔(2 700 m以上)地区则分布着亚高山草甸群落。流域内土壤以灰褐土为主,此外还分布着一定面积的亚高山草甸土。土壤中砾石较多,成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物。

本研究设置了13个研究样地,各样地的面积均为20 m×20 m,其中天然乔木林样地6个,人工林样地3个,灌丛样地3个,亚高山草甸样地1个。各样地具体特征见表1。

表1 不同样地的土壤及植被特征

| 样地 | 坡度/(°) | 坡向 | 海拔/m | 坡位 | 植被类型 | 土层深度/cm | 石砾体积含量/% | 土石混合密度/(g·cm ⁻³) |
|----|--------|----|-------|----|---------|---------|----------|------------------------------|
| A | 34 | E | 2 080 | 下 | 辽东栎 | 120 | 23.76 | 1.07 |
| B | 35 | NW | 2 200 | 中 | 红桦 | 120 | 27.89 | 1.11 |
| C | 35 | NE | 2 120 | 下 | 山杨 | 120 | 11.42 | 1.03 |
| D | 35 | E | 2 220 | 下 | 白桦 | 100 | 22.22 | 1.06 |
| E | 31 | N | 2 060 | 下 | 辽东栎-少脉槲 | 100 | 15.33 | 1.15 |
| F | 7 | SE | 2 155 | 下 | 油松 | 100 | 23.37 | 1.20 |
| G | 32 | SE | 2 180 | 中下 | 华北落叶松 a | 120 | 21.60 | 1.18 |
| H | 45 | SE | 2 286 | 上 | 华北落叶松 b | 100 | 3.73 | 1.22 |
| I | 35 | SW | 2 200 | 下 | 华山松 | 120 | 36.92 | 1.30 |
| J | 33 | S | 2 160 | 下 | 阳坡灌丛 | 120 | 33.32 | 1.31 |
| K | 10 | E | 2 150 | 下 | 东坡灌丛 | 100 | 25.04 | 1.03 |
| L | 32 | SE | 2 230 | 中 | 李灌丛 | 80 | 14.11 | 1.13 |
| M | 25 | N | 2 900 | 上 | 亚高山草甸 | 120 | 0.64 | 1.06 |

2 研究方法

2.1 土壤水分物理性质与持水能力估算

在各标准地周围选择代表性地点挖掘3个土壤剖面,记录土壤剖面发生层次,之后机械划分土层,用200 cm³环刀在0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm深度取土,每层3个重复。利用环刀法测定土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度等物理性质^[8]。

土壤贮水能力的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n (10000 \times h_i \times p_i)$$

其中 S 为土壤的贮水能力($t \cdot hm^{-2}$); h_i 为第 i 层土壤的厚度(m); p_i 为第 i 层土壤的总孔隙度(对应土壤最大贮水能力)或非毛管孔隙度(对应土壤有效贮水能力)(%)。

2.2 土壤渗透性的测定与模拟

利用0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm深度取回的土壤环刀样品,保持土壤原始状态,参照单环有压入渗法^[8]人工供水定量测定土壤渗透过程,确定不同土层的土壤水分入渗的初渗速率和稳渗速率,并利用 Statistica 6.0 非线性拟合方法拟合各方程的过程参数。

3 结果与分析

3.1 土壤水文物理特征

表 2 为六盘山地区主要植被类型的水文物理性质,从表中可见,0 ~ 100 cm 土层的土壤密度均在 1.00 以上,介于 1.03 ~ 1.22 g · cm⁻³。土壤总孔隙度 48.65% ~ 60.48%,非毛管孔隙度 6.10% ~ 29.21%,毛管孔隙度 21.42% ~ 49.75%,砾石体积含量 0.64% ~ 34.53%。就不同植被类型样地土壤持水能力来看,饱和含水率 40.06% ~ 60.81%。从不同的植被类型来看,土壤密度以针叶林类的最大,

平均达 1.23 g · cm⁻³,灌丛类次之,为 1.16 g · cm⁻³,阔叶林的平均为 1.08 g · cm⁻³,亚高山草甸的最小,为 1.06 g · cm⁻³。总孔隙度的大小顺序为亚高山草甸 > 灌丛类 > 阔叶林类 > 针叶林类,非毛管孔隙度大小为灌丛类 > 针叶林类 > 阔叶林类 > 亚高山草甸,毛管孔隙度大小为亚高山草甸 > 阔叶林类 > 针叶林类 > 灌丛类。本地区土壤中含有大量砾石,对土壤水文物理性质产生了较大的影响^[9-10],砾石体积含量大小为灌丛类 > 针叶林类 > 阔叶林类 > 亚高山草甸。

表 2 各植被类型典型研究样地 0 ~ 100 cm 深度土壤物理性质加权平均值

| 样地号 | 植被类型 | 土壤密度/ (g · cm ⁻³) | 饱和含水率/ % | 毛管含水率/ % | 田间持水量/ % | 总孔隙度/ % | 毛管孔隙度/ % | 非毛管孔隙度/ % | 砾石体积含量/ % |
|-----|---------|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| A | 辽东栎 | 1.07 | 57.92 | 36.43 | 31.26 | 57.31 | 36.76 | 20.55 | 21.35 |
| B | 红桦 | 1.11 | 53.89 | 37.84 | 35.88 | 54.09 | 38.00 | 16.09 | 26.73 |
| C | 山杨 | 1.03 | 59.73 | 42.67 | 40.81 | 58.4 | 42.14 | 16.26 | 11.13 |
| D | 白桦 | 1.06 | 56.75 | 39.82 | 37.44 | 55.83 | 39.86 | 15.96 | 22.22 |
| E | 辽东栎-少脉槭 | 1.15 | 48.49 | 38.7 | 36.59 | 55.94 | 43.22 | 12.72 | 15.33 |
| | 阔叶林类 | 1.08 | 55.36 | 39.09 | 36.40 | 56.31 | 40.00 | 16.32 | 19.35 |
| F | 油松 | 1.2 | 44.63 | 35.61 | 32.61 | 53.02 | 42.09 | 10.93 | 23.37 |
| G | 华北落叶松 a | 1.18 | 45.47 | 26.8 | 25.46 | 52.27 | 31.44 | 20.83 | 20.98 |
| H | 华北落叶松 b | 1.22 | 41.73 | 36.15 | 29.24 | 48.65 | 42.55 | 6.10 | 3.73 |
| I | 华山松 | 1.3 | 40.06 | 17.24 | 14.8 | 50.63 | 21.42 | 29.21 | 34.53 |
| | 针叶林类 | 1.23 | 42.97 | 28.95 | 25.53 | 51.14 | 34.38 | 16.77 | 20.65 |
| J | 阳坡灌丛 | 1.31 | 40.11 | 19.76 | 18.26 | 52.19 | 25.62 | 26.57 | 33 |
| K | 东坡灌丛 | 1.03 | 60.81 | 35.33 | 30.26 | 60.48 | 34.46 | 26.02 | 25.04 |
| L | 李灌丛 | 1.13 | 51.42 | 32 | 30.49 | 56.7 | 35.63 | 21.08 | 14.11 |
| | 灌丛类 | 1.16 | 50.78 | 29.03 | 26.34 | 56.46 | 31.90 | 24.56 | 24.05 |
| M | 亚高山草甸 | 1.06 | 58.37 | 49.33 | 46.85 | 58.27 | 49.75 | 8.52 | 0.64 |

3.2 土壤贮水能力

表 3 为不同植被类型样地 0 ~ 100 cm 土壤的贮水能力,结果表明,六盘山主要植被类型的土壤最大贮水量 486.5 ~ 604.8 mm,就不同植被类型来看,最大贮水量表现为亚高山草甸(582.7 mm) > 灌丛类(564.6 mm) > 阔叶林类(563.1 mm) > 针叶林类(511.4 mm)。有效贮水能力 61.0 ~ 292.1 mm,就不同植被类型来看,有效贮水量表现为灌丛类(245.6 mm) > 针叶林类(167.7 mm) > 阔叶林类(163.2 mm) > 亚高山草甸(85.2 mm)。土壤的贮水能力除受植被类型的影响外,还受其它因素的作用。已有研究表明,砾石含量对土壤非毛管孔隙度具有增大效应^[11]。本研究中,由于土壤中砾石含量高,它可能会使土壤中的非毛管孔隙度增大,从而增强了土壤有效贮水能力,但对最大贮水能力的影响很小。图 1 为各样地土壤砾石含量与土壤有效贮水

能力的相关性分析,结果表明砾石是决定土壤有效贮水能力的关键因子之一,它可以解释土壤有效贮水能力变异的 61.94%。

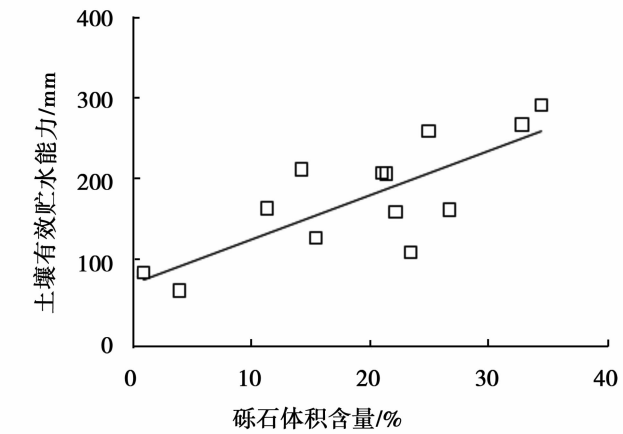


图 1 砾石体积含量对土壤 0 ~ 100 cm 土壤有效贮水能力的影响

表 3 主要植被类型典型样地土壤 0 ～ 100 cm 的贮水能力

| 样地号 | 植被类型 | 最大贮水力/mm | 有效贮水力/mm | 毛管持水力/mm |
|-----|---------|----------|----------|----------|
| A | 辽东栎 | 573.1 | 205.5 | 367.6 |
| B | 红桦 | 540.9 | 160.9 | 380 |
| C | 山杨 | 584 | 162.6 | 421.4 |
| D | 白桦 | 558.3 | 159.6 | 398.6 |
| E | 辽东栎-少脉椴 | 559.4 | 127.2 | 432.2 |
| | 阔叶林类 | 563.1 | 163.2 | 400.0 |
| F | 油松 | 530.2 | 109.3 | 420.9 |
| G | 华北落叶松 a | 486.5 | 61.0 | 425.5 |
| H | 华北落叶松 b | 522.7 | 208.3 | 314.4 |
| I | 华山松 | 506.3 | 292.1 | 214.2 |
| | 针叶林类 | 511.4 | 167.7 | 343.8 |
| J | 阳坡灌丛 | 521.9 | 265.7 | 256.2 |
| K | 东坡灌丛 | 604.8 | 260.2 | 344.6 |
| L | 李灌丛 | 567 | 210.8 | 356.3 |
| | 灌丛类 | 564.6 | 245.6 | 319.0 |
| M | 亚高山草甸 | 582.7 | 85.2 | 497.5 |

3.3 土壤的入渗特征分析

土壤表层的渗透速率更多地反映和决定着土壤的下渗能力,也是能否产生地表径流的决定性条件。对研究区 13 种植被类型样地的表层(0 ～ 10 cm)土壤渗透速率分析表明,初渗速率 4.00 ～ 24.99 mm · min⁻¹,稳渗速率 1.18 ～ 15.17 mm · min⁻¹。不同植被类型典型样地的表层土壤稳渗速率大小顺序为辽东栎-少脉椴 > 李灌丛 > 辽东栎 > 白桦 > 东

坡灌丛 > 3 号华北落叶松 > 阳坡灌丛 > 13 号华北落叶松 > 红桦 > 油松 > 华山松 > 亚高山草甸 > 山杨(见表 4)。从不同的植被类型来看,阔叶林类的稳渗速率最高,平均达 9.04 mm · min⁻¹,其次为灌丛类,平均为 8.85 mm · min⁻¹,针叶林类次之,平均为 5.90 mm · min⁻¹,亚高山草甸类的最小,仅为 2.71 mm · min⁻¹。

表 4 不同植被类型样地表层土壤的初渗速率和稳渗速率 mm · min⁻¹

| 类别 | 样地 | 初渗速率 | 稳渗速率 | 初渗速率 | 稳渗速率 |
|-------|---------|-------|-------|-------|------|
| 阔叶林类 | 辽东栎 | 19.42 | 12.8 | 14.09 | 9.04 |
| | 红桦 | 7.74 | 4.18 | | |
| | 山杨 | 4.00 | 1.18 | | |
| | 白桦 | 14.87 | 11.85 | | |
| | 辽东栎-少脉椴 | 24.43 | 15.17 | | |
| 针叶林类 | 油松 | 7.04 | 4.54 | 12.97 | 5.90 |
| | 华北落叶松 a | 24.61 | 8.7 | | |
| | 华山松 | 5.84 | 3.15 | | |
| | 华北落叶松 b | 14.38 | 7.22 | | |
| 灌丛类 | 阳坡灌丛 | 0.95 | 1.5 | 13.18 | 8.85 |
| | 东坡灌丛 | 18.96 | 11.8 | | |
| | 李灌丛 | 19.62 | 13.26 | | |
| 亚高山草甸 | 亚高山草甸 | 5.72 | 2.71 | 5.72 | 2.71 |

土壤水分入渗模型较多,如 Green-Ampt 方程, Kostiakov 方程, Horton 方程, Phillip 方程等^[12-13]。本文利用 3 个概念较明确且可靠的土壤水分入渗模型来模拟不同土壤层次的入渗过程:Kostiakov 方程 $f(t) = at^{-b}$,式中 $f(t)$ 为入渗透速率, t 为入渗时间, a 、 b 为拟合参数;Horton 方程 $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\beta t}$,式中 $f(t)$ 为入渗透速率, t 为入渗时间, f_0 和 f_c

分别为初渗速率和稳渗速率, β 为经验参数;Phillip 方程 $f(t) = 0.5St^{-1/2} + A$,式中 $f(t)$ 为入渗透速率, S 为吸着率, A 为稳渗速率。模拟结果表明, Kostiakov 公式中,参数 a 一般变化在 0.32 ～ 33.53 之间,平均为 12.8,它与土壤密度、孔隙度等有关,反映的是初渗速率的变化,而 b 值变动在 0.03 ～ 0.64 之间,平均为 0.19, b 值越大,说明渗透速率变化越快,反

之越慢;Horton 公式中,初渗速率取前 2 min 的实测值,而稳渗速率取 90 min 以后的平均值。 β 为表明渗透速率衰减快慢的参数,一般在 0.01 ~ 0.20 之间,平均为 0.06。在 Philip 方程中, S 值反映含水量高低对入渗速率的影响,还可反映土壤孔隙度对渗透的影响,一般来说,吸着率大的土壤渗透速率大,而且渗透速率随着时间减小速率也慢。而 A 值反映了土壤的稳渗速率。 S 值在 1.22 ~ 68.56 cm · min^{-0.5},平均值为 21.02 cm · min^{-0.5}; A 值在 0.04 ~ 18.2 之间,平均为 4.76,利用 Philip 公式模拟的稳渗速率较实际稳渗速率要低。

从拟合结果(见表 5)来看, Kostiakov 公式和 Horton 公式均能对不同植被类型下的土壤渗透过程进行较好地模拟,而 Philip 公式模拟精度较差。

Philip 公式是在假设土壤为均质土壤,初始含水量分布均匀、有积水条件下通过数值解的方法推导出来的,而本研究流域的石质山地土壤,因为土壤质地不均,石砾含量较多,很难适应 Philip 公式的基本条件。虽然 Kostiakov 公式的模拟效果总体较好,但其参数没有具体物理意义,而且从公式的形式上看,初渗速率是无限大的,而当时间无限大时渗透速率又接近于零,与实际不符。相比之下,Horton 公式中引入了具有实际物理意义的初渗速率和稳渗速率,同时模拟效果较好,因此 Horton 方程是模拟土壤水分渗透速率的较好形式。

为了便于生态水文过程的模拟和应用,本文按阔叶林类、针叶林类和灌丛类合并,分别应用 Horton 方程模拟各类植被的水分渗透过程,结果见表 6。

表 5 主要植被类型典型样地土壤层次的渗透速率参数

| 样地号 | 样地 | 土层/ cm | Kostiakov 方程 | | | Horton 方程 | | | | Philip 方程 | | |
|-----|-------------|-----------|--------------|------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|-------|-------|
| | | | a | b | R^2 | f_0 | f_c | β | R^2 | S | A | R^2 |
| A | 辽东栎 | 0 ~ 10 | 22.69 | 0.13 | 0.94 | 19.42 | 12.80 | 0.04 | 0.96 | 30.83 | 11.43 | 0.83 |
| | | 10 ~ 20 | 10.17 | 0.08 | 0.98 | 9.89 | 7.08 | 0.06 | 0.96 | 10.60 | 6.57 | 0.96 |
| | | 20 ~ 40 | 29.20 | 0.18 | 0.98 | 26.77 | 12.96 | 0.07 | 0.96 | 50.26 | 10.42 | 0.98 |
| | | 40 ~ 60 | 14.44 | 0.22 | 0.94 | 12.06 | 5.32 | 0.05 | 0.88 | 26.42 | 4.16 | 0.88 |
| | | 60 ~ 80 | 7.55 | 0.13 | 0.94 | 7.62 | 4.24 | 0.09 | 0.90 | 11.14 | 3.65 | 0.98 |
| | | 80 ~ 100 | 20.80 | 0.16 | 0.98 | 17.38 | 9.90 | 0.04 | 0.98 | 32.89 | 8.49 | 0.88 |
| B | 红桦 | 0 ~ 10 | 33.21 | 0.33 | 0.98 | 24.99 | 6.74 | 0.05 | 0.94 | 68.56 | 4.27 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 5.04 | 0.12 | 0.96 | 4.81 | 2.91 | 0.06 | 0.92 | 6.96 | 2.61 | 0.98 |
| | | 20 ~ 40 | 11.64 | 0.12 | 0.98 | 11.06 | 6.84 | 0.06 | 0.94 | 15.55 | 6.17 | 0.96 |
| | | 40 ~ 60 | 4.82 | 0.20 | 0.94 | 3.85 | 1.77 | 0.03 | 0.94 | 8.79 | 1.51 | 0.81 |
| | | 60 ~ 80 | 9.65 | 0.10 | 0.42 | 11.02 | 6.67 | 0.14 | 0.55 | 13.76 | 5.41 | 0.61 |
| | | 80 ~ 100 | 6.74 | 0.11 | 0.69 | 7.74 | 4.18 | 0.15 | 0.90 | 9.67 | 3.60 | 0.86 |
| C | 山杨 | 0 ~ 10 | 3.97 | 0.26 | 0.90 | 4.00 | 1.18 | 0.09 | 0.62 | 7.77 | 0.89 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 13.59 | 0.45 | 0.92 | 11.62 | 1.96 | 0.13 | 0.86 | 26.59 | 0.53 | 0.94 |
| | | 20 ~ 40 | 1.73 | 0.15 | 0.92 | 1.77 | 0.87 | 0.07 | 0.71 | 2.68 | 0.77 | 0.92 |
| | | 40 ~ 60 | 2.78 | 0.18 | 0.62 | 3.58 | 1.27 | 0.20 | 0.77 | 5.07 | 0.98 | 0.77 |
| | | 60 ~ 80 | 2.49 | 0.26 | 0.94 | 2.35 | 0.78 | 0.09 | 0.90 | 4.88 | 0.54 | 0.98 |
| | | 80 ~ 100 | 0.94 | 0.45 | 0.86 | 0.77 | 0.14 | 0.13 | 0.90 | 1.82 | 0.04 | 0.88 |
| D | 白桦 | 0 ~ 10 | 14.55 | 0.05 | 0.77 | 14.87 | 11.86 | 0.09 | 0.94 | 10.86 | 11.24 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 12.49 | 0.05 | 0.34 | 14.43 | 10.11 | 0.16 | 0.53 | 10.70 | 9.54 | 0.48 |
| | | 20 ~ 40 | 25.60 | 0.11 | 0.37 | 27.27 | 16.36 | 0.11 | 0.49 | 36.99 | 13.68 | 0.48 |
| | | 40 ~ 60 | 3.07 | 0.17 | 0.92 | 2.93 | 1.73 | 0.14 | 0.94 | 4.25 | 1.35 | 0.98 |
| | | 60 ~ 80 | 2.14 | 0.04 | 0.66 | 2.13 | 1.83 | 0.09 | 0.81 | 1.33 | 1.74 | 0.79 |
| | | 80 ~ 100 | 10.68 | 0.38 | 0.98 | 8.15 | 2.01 | 0.07 | 0.98 | 21.95 | 0.87 | 0.98 |
| E | 辽东栎- 少脉椴 | 0 ~ 10 | 25.92 | 0.11 | 0.98 | 24.43 | 15.17 | 0.05 | 0.88 | 33.97 | 14.03 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 25.80 | 0.22 | 0.96 | 21.57 | 9.01 | 0.04 | 0.94 | 48.36 | 7.21 | 0.88 |
| | | 20 ~ 40 | 16.98 | 0.41 | 0.98 | 13.95 | 2.67 | 0.09 | 0.88 | 34.61 | 1.00 | 1.00 |
| | | 40 ~ 60 | 23.45 | 0.22 | 0.98 | 19.23 | 8.08 | 0.04 | 0.94 | 43.42 | 6.66 | 0.90 |
| | | 60 ~ 80 | 24.51 | 0.35 | 0.90 | 18.26 | 5.23 | 0.07 | 0.90 | 50.35 | 2.68 | 0.90 |
| | | 80 ~ 100 | 17.43 | 0.30 | 0.88 | 12.50 | 3.92 | 0.04 | 0.88 | 35.53 | 2.75 | 0.83 |

| 续表 5 | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------------|------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|-------|-------|
| 样地号 | 样地 | 土层/ cm | Kostiakov 方程 | | | Horton 方程 | | | | Philip 方程 | | |
| | | | a | b | R^2 | f_0 | f_c | β | R^2 | S | A | R^2 |
| F | 油松 | 0 ~ 10 | 8.26 | 0.12 | 0.94 | 7.04 | 4.54 | 0.03 | 0.96 | 10.86 | 4.27 | 0.79 |
| | | 10 ~ 20 | 11.34 | 0.19 | 0.90 | 9.89 | 5.05 | 0.07 | 0.94 | 19.70 | 4.02 | 0.92 |
| | | 20 ~ 40 | 10.13 | 0.16 | 0.98 | 8.69 | 4.76 | 0.04 | 0.96 | 15.95 | 4.19 | 0.90 |
| | | 40 ~ 60 | 3.01 | 0.07 | 0.96 | 2.85 | 2.18 | 0.04 | 0.90 | 2.64 | 2.09 | 0.85 |
| | | 60 ~ 80 | 23.76 | 0.16 | 0.98 | 20.23 | 11.27 | 0.04 | 0.98 | 37.76 | 9.72 | 0.90 |
| | | 80 ~ 100 | 28.95 | 0.37 | 1.00 | 22.50 | 5.32 | 0.07 | 0.94 | 60.00 | 2.53 | 0.98 |
| G | 华北落叶松 | 0 ~ 10 | 31.97 | 0.29 | 0.98 | 24.61 | 8.70 | 0.06 | 0.98 | 64.27 | 5.53 | 0.94 |
| | | 10 ~ 20 | 14.18 | 0.14 | 0.86 | 11.91 | 7.13 | 0.03 | 0.90 | 20.29 | 6.53 | 0.69 |
| | | 20 ~ 40 | 27.44 | 0.25 | 0.94 | 20.70 | 8.40 | 0.04 | 0.96 | 52.85 | 6.36 | 0.86 |
| | | 40 ~ 60 | 23.42 | 0.24 | 0.81 | 16.08 | 7.23 | 0.03 | 0.92 | 43.76 | 5.94 | 0.69 |
| | | 60 ~ 80 | 2.99 | 0.11 | 0.38 | 3.74 | 1.89 | 0.15 | 0.71 | 5.05 | 1.56 | 0.53 |
| | | 80 ~ 100 | 18.58 | 0.32 | 0.96 | 12.75 | 4.28 | 0.04 | 0.98 | 38.11 | 2.61 | 0.90 |
| H | 华北落叶松 | 0 ~ 10 | 18.08 | 0.19 | 0.96 | 14.38 | 7.17 | 0.03 | 0.98 | 31.32 | 6.19 | 0.85 |
| | | 10 ~ 20 | 4.70 | 0.17 | 0.98 | 3.80 | 2.13 | 0.04 | 0.98 | 7.47 | 1.89 | 0.86 |
| | | 20 ~ 40 | 24.81 | 0.24 | 0.94 | 18.51 | 7.57 | 0.03 | 0.98 | 48.09 | 5.94 | 0.85 |
| | | 40 ~ 60 | 0.95 | 0.21 | 0.85 | 1.00 | 0.38 | 0.11 | 0.92 | 1.82 | 0.27 | 0.94 |
| | | 60 ~ 80 | 8.18 | 0.30 | 0.98 | 6.38 | 1.95 | 0.05 | 0.94 | 16.59 | 1.35 | 0.94 |
| | | 80 ~ 100 | 1.59 | 0.12 | 0.96 | 1.52 | 0.95 | 0.06 | 0.96 | 2.13 | 0.85 | 0.96 |
| I | 华山松 | 0 ~ 10 | 7.01 | 0.17 | 0.96 | 5.84 | 3.15 | 0.03 | 0.96 | 11.11 | 2.82 | 0.83 |
| | | 10 ~ 20 | 15.64 | 0.14 | 0.98 | 14.33 | 8.29 | 0.05 | 0.90 | 22.77 | 7.44 | 0.94 |
| | | 20 ~ 40 | 1.43 | 0.11 | 0.69 | 1.19 | 0.82 | 0.02 | 0.83 | 1.55 | 0.82 | 0.45 |
| | | 40 ~ 60 | 32.07 | 0.19 | 0.74 | 34.04 | 14.30 | 0.13 | 0.85 | 58.32 | 10.86 | 0.86 |
| J | 阳坡灌丛 | 0 ~ 10 | 13.55 | 0.11 | 0.66 | 10.99 | 7.65 | 0.02 | 0.79 | 15.07 | 7.76 | 0.45 |
| | | 10 ~ 20 | 2.26 | 0.25 | 0.98 | 1.86 | 0.69 | 0.05 | 0.94 | 4.43 | 0.51 | 0.94 |
| | | 20 ~ 40 | 32.07 | 0.16 | 0.96 | 26.63 | 15.17 | 0.03 | 0.98 | 49.40 | 13.60 | 0.86 |
| | | 40 ~ 60 | 16.88 | 0.08 | 0.83 | 15.77 | 11.96 | 0.05 | 0.88 | 17.18 | 11.08 | 0.79 |
| | | 60 ~ 80 | 8.16 | 0.10 | 0.64 | 7.57 | 4.93 | 0.03 | 0.61 | 9.60 | 4.72 | 0.53 |
| | | 80 ~ 100 | 2.06 | 0.21 | 0.96 | 1.70 | 0.75 | 0.04 | 0.92 | 3.67 | 0.65 | 0.88 |
| K | 东坡灌丛 | 0 ~ 10 | 18.70 | 0.10 | 0.92 | 18.96 | 11.79 | 0.07 | 0.88 | 23.76 | 10.69 | 0.98 |
| | | 10 ~ 20 | 15.96 | 0.03 | 0.85 | 16.31 | 13.76 | 0.08 | 0.92 | 8.53 | 13.32 | 0.94 |
| | | 20 ~ 40 | 11.79 | 0.04 | 0.76 | 11.15 | 9.71 | 0.02 | 0.74 | 6.12 | 9.67 | 0.61 |
| | | 40 ~ 60 | 27.49 | 0.08 | 0.98 | 25.86 | 19.23 | 0.04 | 0.98 | 27.17 | 18.20 | 0.92 |
| | | 60 ~ 80 | 1.37 | 0.13 | 0.55 | 0.91 | 0.66 | 0.01 | 0.45 | 1.62 | 0.71 | 0.32 |
| | | 80 ~ 100 | 0.32 | 0.25 | 0.85 | 2.20 | 0.89 | 0.03 | 0.96 | 6.05 | 0.76 | 0.72 |
| L | 李灌丛 | 0 ~ 10 | 21.58 | 0.11 | 0.94 | 19.62 | 13.26 | 0.05 | 0.98 | 27.71 | 11.87 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 22.68 | 0.26 | 0.94 | 17.36 | 6.51 | 0.04 | 0.98 | 44.07 | 4.97 | 0.86 |
| | | 20 ~ 40 | 24.96 | 0.23 | 0.90 | 23.20 | 9.61 | 0.09 | 0.98 | 47.30 | 6.71 | 0.96 |
| | | 40 ~ 60 | 5.89 | 0.05 | 0.92 | 5.44 | 4.62 | 0.03 | 0.94 | 4.16 | 4.46 | 0.81 |
| | | 60 ~ 80 | 4.66 | 0.20 | 0.92 | 3.53 | 1.76 | 0.03 | 0.98 | 8.01 | 1.55 | 0.79 |
| | | 80 ~ 100 | 33.53 | 0.32 | 0.98 | 26.94 | 8.19 | 0.07 | 0.96 | 68.10 | 4.76 | 0.98 |
| M | 亚高山草甸 | 0 ~ 10 | 6.84 | 0.20 | 0.98 | 5.72 | 2.71 | 0.04 | 0.96 | 11.92 | 2.29 | 0.92 |
| | | 10 ~ 20 | 1.76 | 0.21 | 0.98 | 1.60 | 0.68 | 0.06 | 0.92 | 3.18 | 0.55 | 0.98 |
| | | 20 ~ 40 | 2.79 | 0.21 | 0.98 | 2.30 | 1.06 | 0.05 | 0.98 | 5.00 | 0.86 | 0.94 |
| | | 40 ~ 60 | 1.22 | 0.21 | 1.00 | 1.01 | 0.47 | 0.05 | 0.96 | 2.17 | 0.38 | 0.94 |
| | | 60 ~ 80 | 1.43 | 0.15 | 0.92 | 1.44 | 0.76 | 0.08 | 0.90 | 2.22 | 0.64 | 0.96 |
| | | 80 ~ 100 | 1.02 | 0.20 | 0.88 | 0.75 | 0.38 | 0.03 | 0.96 | 1.74 | 0.35 | 0.74 |

表 6 不同植被类型各土层土壤渗透率 Horton 方程参数

| 土层/cm | 阔叶林类 | | | | 针叶林类 | | | | 灌丛类 | | | |
|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------|-------|
| | f_0 | f_c | β | R^2 | f_0 | f_c | β | R^2 | f_0 | f_c | β | R^2 |
| 0~10 | 17.5 | 9.4 | 0.045 | 0.95 | 13.0 | 5.7 | 0.040 | 0.99 | 16.5 | 10.6 | 0.035 | 0.93 |
| 10~20 | 12.5 | 6.2 | 0.071 | 0.87 | 10.0 | 4.9 | 0.027 | 0.86 | 11.8 | 6.9 | 0.042 | 0.97 |
| 20~40 | 16.2 | 7.5 | 0.070 | 0.94 | 12.2 | 5.1 | 0.033 | 0.98 | 20.3 | 10.9 | 0.041 | 0.91 |
| 40~60 | 8.3 | 3.8 | 0.054 | 0.82 | 13.5 | 5.8 | 0.056 | 0.85 | 15.7 | 11.9 | 0.043 | 0.99 |
| 60~80 | 6.8 | 2.6 | 0.058 | 0.87 | 13.3 | 4.4 | 0.063 | 0.62 | 4.0 | 2.3 | 0.022 | 0.87 |
| 80~100 | 9.7 | 3.9 | 0.039 | 0.95 | 12.3 | 2.1 | 0.033 | 0.79 | 10.3 | 3.2 | 0.059 | 0.96 |

3.4 土壤渗透性影响因素的分析

土壤渗透性受土壤结构、质地、土壤初始含水率、孔隙度、植被、砾石含量等多种因素的综合影响^[6]。本研究分析了不同植被类型典型样地不同土层的土壤初渗速率(*BI*)、稳渗速率(*SI*)与对应的土壤物理性质、石砾含量等因子的相关性,并通过逐步回归建立线性方程。土壤物理性质主要包括密度(*WV*)、毛管孔隙度(*CC*)、非毛管孔隙度(*NC*)、总孔隙度(*SC*)、砾石含量(*SL*)共 5 个指标。结果表明

(表 7)与初渗速率和稳渗速率相关性最紧密的因素都是非毛管孔隙度;砾石含量与总孔隙度和毛管孔隙度成负相关,而非毛管孔隙度呈正相关,说明砾石含量对于非毛管孔隙和稳渗速率的大小具有一定作用。土壤渗透速率与各土壤物理性质的逐步回归方程分别为: $SI = -0.918\ 4 + 34.415\ 4\ NC$ ($R = 0.651\ 1$); $BI = 7.279\ 4 + 55.981\ NC - 17.085\ 6\ CC$ ($R = 0.679\ 9$)。从回归结果看出,土壤非毛管孔隙度对土壤的渗透性起到最主要的作用。

表 7 土壤渗透速率与各土壤物理因子的相关性

| 项目 | 土壤密度 | 总孔隙度 | 毛管孔隙度 | 非毛管孔隙度 | 砾石含量 |
|------|-------|------|-------|--------|------|
| 稳渗速率 | -0.24 | 0.26 | -0.31 | 0.65 | 0.20 |
| 初渗速率 | -0.07 | 0.08 | -0.49 | 0.66 | 0.34 |

4 结论与讨论

(1)对六盘山香水河小流域典型研究样地的贮水能力研究表明,各植被类型的最大贮水能力变化在 486.5~604.8 mm,就植被类型间差异看,亚高山草甸>灌丛类>阔叶林类>针叶林类。有效贮水能力在 61.0~292.1 mm 之间,就植被类型间差异看,灌丛类>针叶林类>阔叶林类>亚高山草甸。对 0~100 cm 土层的有效贮水能力与石砾体积分含量的研究表明,砾石含量的大小是影响土壤有效贮水能力的关键因素。

(2)六盘山香水河小流域典型研究样地土壤表层(0~10 cm)的土壤初渗速率介于 4.00~24.99 mm·min⁻¹之间,稳渗速率介于 1.18~15.17 mm·min⁻¹。就不同植被类型差异看,灌丛类>阔叶林类>针叶林类>亚高山草甸类。

利用 Kostiakov 公式、Horton 公式、Philip 公式 3 种渗透模型模拟了香水河小流域典型研究样地的土壤渗透性,结果表明,使用 Horton 公式模拟土壤水分渗透性效果较好,且参数均具有实际的物理意义。各植被类型表层土壤入渗 Horton 方程分别为:

阔叶林类: $f(t) = 9.4 + 8.1e^{-0.045\ t}$

针叶林类: $f(t) = 5.7 + 7.3e^{-0.040\ t}$

灌丛类: $f(t) = 10.6 + 5.9e^{-0.035\ t}$

亚高山草甸: $f(t) = 2.71 + 3.01e^{-0.040\ t}$

式中, $f(t)$ 为入渗透速率, t 为入渗时间。

影响土壤渗透性能的因素有很多,但多数学者都认为土壤物理性质与土壤渗透性具有密切关系。王鹏程等^[14]对三峡库区主要植被类型的土壤渗透性特征研究发现,土壤渗透速率与土壤密度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度均成极显著关系,杜阿朋等^[15]在六盘山北坡研究发现,土壤的稳渗速率与总孔隙度成显著正相关性,而非毛管孔隙度和毛管孔隙度关系不显著。曾立雄等^[16]在三峡库区研究发现,土壤稳渗速率与土壤非毛管孔隙度和总孔隙度成显著正相关关系,李海光等^[17]在黄土高原的研究表明,土壤稳渗速率与土壤密度和土壤非毛管孔隙度显著相关,特别是非毛管孔隙度。霍小鹏等^[18]在川西米亚罗林区研究发现,土壤渗透速率与土壤密度极显著负相关,与非毛管孔隙度极显著正相关。Helalia^[19]研究表明,土壤稳渗率与土壤结构关系密切,特别是有效孔隙度与稳定入渗率的相关

性非常显著。本研究发现,土壤渗透速率主要受土壤非毛管孔隙度的影响,这与上述研究结果相似。由于本研究中土壤砾石的含量较高,砾石的存在对土壤物理性质及土壤渗透性也具有较大的影响,时忠杰等^[10]研究表明砾石含量增加会导致土壤大孔隙度的半径增大,并且增加了半径 $>1.4\text{ mm}$ 的较大孔隙的密度,而较小的大孔隙密度对于土壤水分的渗透影响却较大,仅占总孔隙密度 6.86% 的半径 $>1.4\text{ mm}$ 大孔隙密度可以解释稳定出流速率的 67.4% 。由此说明,土壤稳渗速率可能主要是土壤中存在的砾石改变土壤中大孔隙(即非毛管孔隙)的半径和密度分布,从而影响着土壤水分的渗透,本研究中渗透速率与土壤中砾石含量呈正相关也从侧面证明了这一点。

(3) 六盘山林区为我国黄土高原中西部重要的水源涵养林区,通过合理的管理发挥其水源涵养功能非常重要。通过本研究表明,针叶林类的贮水能力相对较低,而阔叶林类、灌丛类和亚高山草甸类的贮水能力较高,从稳渗速率来看,除亚高山草甸外,针叶林类森林的稳渗速率也是最低的。从林分类型来看,针叶林类中,除华山松为天然林外,华北落叶松林和油松林均为人工林,在六盘山自然保护区内所占面积较大,由于经营活动的影响,制约着人工林的涵养水源能力。作为非常重要的国家级自然保护区,在未来的管理中除加强即有林分的保护外,还应加强对现有人工林分的管理,发挥森林生态系统的多重功能,按照近自然林业管理的方法,促进人工林向天然林的转变,从而提高林区土壤涵养水分的能力。

参考文献:

- [1] 党宏忠,周泽福,赵雨森,等. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J]. 林业科学研究,2006,19(1):39-44
- [2] 张光灿,刘霞. 泰山几种林分枯落物和土壤水文效应研究[J]. 林业科技通讯,1999(2):28-29
- [3] 王力,邵明安,王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. 林业科学,2005,41(2):147-153
- [4] 李德生,张萍,张水龙,等. 黄前库区森林土壤蓄水能力研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2004,28(1):25-28
- [5] 余新晓,张建军,朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J]. 林业科学,1996,32(4):289-296
- [6] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2003:97-110
- [7] Lin H S, McInnes K J. Macro-porosity and initial moisture effects on infiltration rates in Vertisols and Vertic intergrades[J]. Soil Science,1998,163(1):2-8
- [8] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:98-100
- [9] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. 生态学报,2008,28(12):6090-6098
- [10] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响[J]. 生态学报,2008,28(10):4929-4939
- [11] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响[J]. 山地学报,2007,25(5):541-547
- [12] 赵西宁,吴发店. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):42-45
- [13] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey lakes watershed, central Ontario[J]. Journal Hydrology, 2005, 306:1-20
- [14] 王鹏程,肖文发,张守攻,等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(6):50-55
- [15] 杜阿朋,何常清,管伟,等. 六盘山叠叠沟小流域土壤稳渗速率及其影响因子[J]. 林业科学,2009,45(10):25-31
- [16] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等. 兰陵溪小流域主要退耕还林植被土壤渗透特征[J]. 水土保持学报,2010,24(3):199-202
- [17] 李海光,余新晓,张满良,等. 黄土高原丘陵沟壑第三副区小流域土壤渗透特性研究[J]. 水土保持研究,2010,17(2):75-79,85
- [18] 霍小鹏,李贤伟,张健,等. 川西亚高山人工针叶林枯落物持水与土壤渗透性能[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(5):540-545
- [19] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(8):39-47