

川西北高山/亚高山区6种典型土壤类型水文效应*

程欢¹ 程一伦¹ 官渊波^{1**} 熊仕臣¹ 张亚贝¹ 刘江山¹ 刘良松¹ 吴强² 孙超³

¹四川农业大学林学院 成都 611130

²泸州市水务局 泸州 646000

³内蒙古民族大学 通辽 028000

摘要 通过测定川西北高山/亚高山区6种典型土壤类型(亚高山草甸土、高原草甸土、暗棕壤、棕壤、黄棕壤、褐土)不同土层深度有机碳含量、容重、孔隙度、持水蓄水及渗透性能,揭示6种土壤类型孔隙度及水文效应差异及在垂直空间的变化规律,建立6种土壤类型渗透速率与时间关系的渗透模型。结果显示:(1)0-100 cm土层6种土壤类型有机碳含量均值表现为高原草甸土>亚高山草甸土>褐土>棕壤>黄棕壤>暗棕壤;不同土壤类型有机碳含量在相同土层差异显著($P < 0.05$),同一土壤类型随土层加深而减小;容重在0.87-1.79 g/cm³之间,随土层加深容重增加;总孔隙度为37.6%-55.81%。(2)0-100 cm土层自然贮水量、最大持水量、非毛管持水量平均值亚高山草甸土最高;田间持水量、涵蓄降水量黄棕壤最高;随土层加深,最大持水量、毛管持水量、非毛管水量、田间持水量、涵蓄降水量增加。(3)6种土壤类型均表现为初渗速率大于稳渗速率,土壤类型间差异显著,渗透速率与时间呈幂函数关系,接近于考斯加柯夫公式。上述研究表明土壤类型的差异对孔隙特征和水文效应的作用显著,主要集中在土壤最大持水量、非毛管持水量及渗透速率方面;结果可为川西北地区不同土壤类型背景下生态环境恢复重建、生态系统水源涵养功能评价提供理论依据。(图2表5参26)

关键词 土壤类型;水文效应;孔隙度;持水量;渗透率;川西北高山/亚高山

CLC S714.2

Hydrological effect of six soil types in northwestern Sichuan alpine and subalpine mountains*

CHENG Huan¹, CHENG Yilun¹, GONG Yuanbo^{1**}, XIONG Shichen¹, ZHANG Yabei¹, LIU Jiangshan¹, LIU Liangsong¹, WU Qiang² & SUN Chao³

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Luzhou Water Conservancy Bureau, Luzhou 646000, China

³ Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028000, China

Abstract This study evaluates the differences in porosity, hydrological effect characteristics, and the changes in different layer of six soil types (cinnamon soil, yellow-brown soil, brown soil, dark brown soil, plateau meadow soil, subalpine meadow soil) in northwestern Sichuan alpine and subalpine mountains. The research was conducted by measuring the soil organic carbon content, bulk density, porosity, water storage and water permeability in different soil types and at different depths, and by creating a model for soil infiltration rate and time. The results showed that (1) the average organic carbon content of the six soil types in the 0-100 cm depth soil layer was ranked as follows: plateau meadow soil > subalpine meadow soil > cinnamon soil > brown soil > yellow-brown soil > dark brown soil. In the same soil layer, the organic carbon content of the six soil types differed significantly and decreased with depth. The bulk density of the six soil types ranged from 0.87-1.79 g/cm³ and increased with depth. The total porosity of the different soil types ranged from 37.6%-55.81%. (2) The natural water storage, maximum water holding capacity and non-capillary water holding capacity in the 0-100 cm soil layer were highest in the subalpine meadow soil. The field water capacity and available soil water storage were highest in the yellow-brown soil. The maximum moisture capacity, capillary water holding capacity, non-capillary water holding capacity, field water capacity, and available soil water storage increased with depth. (3) According to the water infiltration model used in this study, the six soil types had an initial infiltration rate that was higher than the stable infiltration rate. The relationship between the infiltration rate and time could be described by the power function, which was close to the Kostiakov's equation. The differences in soil type significantly influenced the porosity and hydrological effects, especially on maximum moisture capacity, non-capillary water holding capacity and infiltration rate. These results could provide a

收稿日期 Received: 2018-05-24 接受日期 Accepted: 2018-06-19

*国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目和四川农业大学科研兴趣培养计划项目(2018144, 2018143)资助 Supported by the Sci-tech Pillar Program of the 12th Five-year Plan of China (2011BAC09B05), the Project of Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Colleges and Universities, and the Research and Development Program of Sichuan Agricultural University (2018144, 2018143)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: gyb@sicau.edu.cn)

theoretical basis for the restoration and reconstruction of ecological environments and the evaluation of water conservation functions of ecological systems in different soil types in Northwest Sichuan.

Keywords soil type; hydrological effect; porosity; moisture capacity; permeability; northwestern Sichuan alpine and subalpine mountains

森林水文效应是生态系统中森林调节水分运输、降水分配、水分利用等综合功能的体现,土壤层所发挥的水文效应是森林生态系统发挥水文调节作用、水源涵养功能的重要组成部分^[1-3],体现为蓄水能力和入渗特性^[4],土壤孔隙特征是其影响因素^[5-7]。从土壤孔隙特征的角度,毛管孔隙度较大时,土壤中有效水的贮存量越大,用于植被自身生长发育的有效水分的比例越大;非毛管孔隙度越大时,土壤通透性越好,能够增加降水的下渗,从而减少地表径流,可充分发挥涵养水源功能^[8]。超渗流理论表明,入渗率高的土壤,可使较多降水入渗到土壤中;而入渗率较低的土壤,降水储存较少,导致地表径流增大,水土极易随径流损失。因此可见,土壤渗透性能对地表径流量大小和速率具有直接调控作用,对土壤侵蚀和物质运转等过程具有重要影响,其是土壤水文生态功能的重要体现,也是土壤抗侵蚀能力的度量标准^[9-10]。

川西北高山/亚高山森林生态系统作为我国第二大林区,地处青藏高原东南缘^[11],构成西南及长江、黄河的重要水源涵养区,发挥着生态水文、区域气候调节和生物多样性保持等重要功能,是我国天然林保护、防护林工程、植被恢复的重点区域^[12-13],该区地形地貌复杂,生态位多样,人工林树种单一,经营技术落后,生态环境十分脆弱^[14],以及海拔较高,人为干扰小,环境梯度差异明显,植被分布典型,土壤类型丰富,是深入研究土壤水文效应的理想区域。目前,有关川西北高山/亚高山生态系统水文效应的研究主要集中在不同土地利用类型地被物和土壤的水文效应比较,典型生态系统的水文效应研究,内容涉及冠层截留、地被物持水特征、森林蒸发散、土壤入渗等诸多方面^[15-17],但由于自然条件的限制,以该区典型土壤类型为对象的水文效应研究相对较少。本研究拟解决如下问题:(1)不同土壤类型孔隙特征及持水能力有何差异?(2)不同土壤类型水分入渗能力如何?

(3)土壤孔隙特征与水文效应关系如何?本研究旨在为确定长江上游水源涵养林的恢复与重建模式,为阐明川西北高山/亚高山区域典型土壤类型水文效应的变化规律和水源涵养功能评价提供基础资料。

1 研究区概况

研究区地处青藏高原东南边缘,川西北高山峡谷与横断山脉北端的结合部,地貌以中部为山原区,东南部以高山峡谷区为主,属四川省阿坝州中部红原县及东南部理县、茂县(102°32'39.77"-103°51'12.02"E, 31°26'11.72"-N32°47'27.13"N)。气候随着海拔高度变化较大,从亚热带到温带、寒温带、寒带,呈明显的垂直性分布,在海拔2 500 m以下的河谷地带中,该地带降水集中,蒸发量大,属于干旱、半干旱地带,2 500-4 100 m海拔之间的坡谷地带则是寒温带,年平均气温为1-5℃,4 100 m海拔以上属于寒带,终年积雪。

研究区所处的川西北高原地带,是我国两大阶梯自然地理垂直地带的过渡带,属世界十大生物多样性之一的青藏高原,也是我国川西—滇北植物特有现象中心的重要组成部分。该区土壤类型丰富,主要包含有红壤、黄壤、棕壤、褐土、暗棕壤、沼泽土、泥炭土、高山草甸土、亚高山草甸土、高山寒漠土等19个土类33个亚类。

2 研究方法

2.1 样品采集

2015年8-9月,选择研究区亚高山草甸土(S1)、高原草甸土(S2)、暗棕壤(S3)、棕壤(S4)、黄棕壤(S5)、褐土(S6)6个典型土壤类型。每个土壤类型分别根据海拔高度、植被特征、坡度坡向等差异选择10个样方,去除表层凋落物,挖掘1.0 m深土壤剖面,依据土壤发生层次划分为A层(腐殖质)、B层(淀积层)、C层(母质层),每个样方设置3个土壤剖面为重复,分别采集3层,取样后同一样方相同土层的3个剖面土样均匀混合,装入密封样品袋,带回实验室备用。因地形因素部分土壤类型样方数未达到10个,其中黄棕壤8个、高原草甸土5个,由于部分土壤层次发育不明显或不完整,数据处理时将AB层划分为B层,若BC层超过1.0 m深,无明显C层,则将BC层划分为C层,样地基本情况见图1、表1。

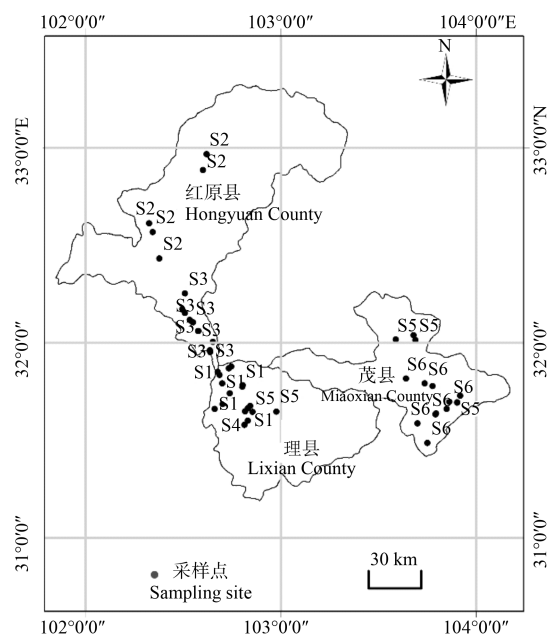


图1 采样点分布图。S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土。

Fig. 1 Description of the sampling points. S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil.

表1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of the plots

土壤类型 Soil type	地点 Location	海拔范围 Elevation range (h/m)	植被类型 Vegetation type
S1	红原县 Hongyuan County	3432-4136	高山柳、杜鹃、大叶杜鹃、窄叶鲜卑、高山绣菊、紫花杜、金腊梅、西藏忍冬等 <i>Salix cupularis</i> , <i>Rhododendron simsii</i> , <i>Rhododendron faberi</i> sp. <i>prattii</i> , <i>Sibiraea angustata</i> , <i>Spiraea mongolica</i> , <i>Rhododendron amesiae</i> , <i>Chimonanthus praecox</i> , <i>Lonicera semenovii</i> , et al.
S2	红原县 Hongyuan County	3521-3543	草甸为主 Grassland
S3	红原县 Hongyuan County	3405-3737	云杉、冷杉、岷江柏、杜鹃 <i>Picea asperata</i> , <i>Abies fabri</i> , <i>Cupressus chengiana</i> , <i>Rhododendron simsii</i>
S4	理县 Lixian County	2534-3370	云杉、岷江柏、落叶松、山杨、铁杉、红桦、白桦、槭树、耕地等 <i>Picea asperata</i> , <i>Cupressus chengiana</i> , <i>Larix gmelinii</i> , <i>Populus davidiana</i> , <i>Tsuga chinensis</i> Pritz, <i>Betula albo-sinensis</i> , <i>Betula platyphylla</i> , <i>Aceraceae</i> , et al.
S5	茂县 Maoxian County	1842-2330	岷江柏、油松、刺槐、臭椿、苹果、花椒、白桦、青冈 <i>Cupressus chengiana</i> , <i>Pinus tabulaeformis</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Ailanthus altissima</i> , <i>Malus domestica</i> , <i>Zanthoxylum bungeanum</i> , <i>Betula platyphylla</i> , <i>Quercus glauca</i>
S6	茂县 Maoxian County	1319-1694	退耕还林后侧柏、岷江柏、油松、臭椿 <i>Platycladus orientalis</i> , <i>Cupressus chengiana</i> , <i>Pinus tabulaeformis</i> , <i>Ailanthus altissima</i>

S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土。

S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil.

2.2 试验方法

土壤含水量、土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度采用环刀法测定 (LY/T1215—1999) [18], 土壤入渗采用双环刀法 [19], 在室内进行测定。

$$P = \frac{M - M_0}{V}$$

$$K = C_1 - C \times P / Q$$

$$K_1 = C_3 \times P / M$$

$$K_2 = C + C_2$$

$$C_5 = 1000 \times K_2 \times H \times Q$$

$$C_4 = 1000 \times C_2 \times H \times Q$$

式中, P 为土壤容重 (g/cm^3), M 为环刀和土质量 (g), M_0 为环刀质量 (g), V 为环刀体积 (cm^3), Q 为水的比重 (g/cm^3), K 为土壤非毛管孔隙度 (%), K_1 为土壤毛管孔隙度 (%), K_2 为土壤总孔隙度 (%), C 为毛管持水量 (%), C_1 为最大持水量 (%), C_2 为土壤非毛管孔隙度 (%), C_3 为毛管持水量 (%), C_4 为有效土壤持水量 (mm), C_5 为土壤最大持水量 (mm), H 为土层。

2.3 数据处理

采用Excel 2007、SPSS 20.0统计软件对数据进行分析, 采用单因素方差分析比较土壤类型间水文物理性质的差异, 采用Pearson相关分析水文效应与土壤有机碳含量、孔隙度特征的相关关系。

3 结果与分析

3.1 不同土壤类型孔隙特征

如表2所示, 0-100 cm土层不同土壤类型的土壤容重为 $S4 (1.44 \text{ g}/\text{cm}^3) > S5 (1.40 \text{ g}/\text{cm}^3) > S2 (1.29 \text{ g}/\text{cm}^3) > S3 (1.25 \text{ g}/\text{cm}^3) > S1 (1.17 \text{ g}/\text{cm}^3) > S6 (1.14 \text{ g}/\text{cm}^3)$; 从不同土层深度来看, 6种土壤类型均随着土层加深容重增加。0-100 cm土层不同土壤类型有机碳含量为 $S2 (117.53 \text{ g}/\text{kg}) > S1 (117.19 \text{ g}/\text{kg}) > S6 (112.43 \text{ g}/\text{kg}) > S4 (99.95 \text{ g}/\text{kg}) > S5 (79.61 \text{ g}/\text{kg}) > S3 (39.52 \text{ g}/\text{kg})$; 6种土壤类型均表现为随着土层厚度加

深逐渐减小; A层S6土壤有机碳含量最高 ($146.32 \text{ g}/\text{kg}$), S3 ($62.26 \text{ g}/\text{kg}$) 有机碳含量最低, B层为S6 ($108.37 \text{ g}/\text{kg}$) 最高, S3最低 ($33.79 \text{ g}/\text{kg}$), C层S2最高 ($105.47 \text{ g}/\text{kg}$), S3 ($22.50 \text{ g}/\text{kg}^{-1}$) 最低。0-100 cm土层不同土壤类型非毛管孔隙度表现为 $S3 (17.28\%) > S1 (16.36\%) > S6 (15.39\%) > S5 (12.69\%) > S4 (11.27\%) > S2 (8.87\%)$; 不同土壤类型随不同土层的非毛管孔隙度变化规律有所差异, 其中S6、S3、S1非毛管孔隙度随土层加深呈先升高后降低, 表现为B层最大; S5、S4、S2表现为随土层加深呈减小规律, C层最小。在0-100 cm土层不同土壤类型毛管孔隙度为 $S2 (38.87\%) > S5 (34.06\%) > S1 (33.98\%) > S4 (33.29\%) > S6 (33.27\%) > S3 (29.95\%)$; 不同土壤类型随土层加深毛管孔隙度表现为S3、S1呈先降低后升高, S6、S4、S2呈逐渐减小的规律; S5呈先升高后降低的规律。

3.2 不同森林土壤类型持蓄水能力

由表3可知, 0-100 cm土层不同土壤类型的自然贮水量为 $S1 (33.33 \text{ mm}) > S6 (30.58 \text{ mm}) > S2 (29.93 \text{ mm}) > S3 (17.31 \text{ mm}) > S5 (16.29 \text{ mm}) > S4 (8.41 \text{ mm})$; 随土层加深不同土壤类型自然贮水量规律不同, S6、S4、S3呈先增加后减少的规律, B层最高; S5为逐渐增加, C层最大; 而S2不同土层变化不大, S1表现为先减小后增加的规律; A层表现为S2最大 (29.92 mm), B层表现为S6 (39.13 mm) 最大, C层表现为S1最大 (44.57 mm), S4在不同土层均最小, 分别为7.43、10.64、7.15 mm。最大持水量在0-100 cm土层表现为 $S1 (175.16 \text{ mm}) > S6 (165.13 \text{ mm}) > S5 (158.63 \text{ mm}) > S3 (158.00 \text{ mm}) > S2 (148.97 \text{ mm}) > S4 (144.66 \text{ mm})$; 6种土壤类型随土层深度均表现为增加的规律; A层不同土壤类型无显著差异, B则表现为S4和S2显著低于其余4种土壤类型, C层S1最大 (253.69 mm), 显著高于其余5种土壤类型, S4最小 (189.65 mm)。0-100 cm土层不同土壤类型毛管持水量为 $S5 (118.87 \text{ mm}) > S2 (118.44 \text{ mm}) > S1 (117.96 \text{ mm}) > S6 (112.18 \text{ mm}) > S4 (110.60 \text{ mm}) > S3 (101.35 \text{ mm})$; A、B层均表现为S2显著高于其余5种土壤类型, C层表现为S5最大 (175.96 mm)。0-100 cm土层不同土壤类型非毛管持水量为 $S1 (57.19 \text{ mm}) > S3 (56.65 \text{ mm})$

表2 不同土壤类型有机碳含量及孔隙特征
Table 2 Soil organic matter contents and physical properties in different soil types

土壤类型 Soil type	土层 Soil layer	容重 Bulk density ($\rho/\text{g cm}^{-3}$)	有机碳 Organic matter ($w/\text{g kg}^{-1}$)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity ($\phi/\%$)	毛管孔隙度 Capillary porosity ($\phi/\%$)	总孔隙度 Total porosity ($\phi/\%$)
S1	A	1.00 ± 0.18b	142.21 ± 19.52a	13.73 ± 4.09ab	39.20 ± 6.52ab	52.93 ± 5.22ab
	B	1.16 ± 0.22b	108.29 ± 12.63a	21.02 ± 5.65a	30.10 ± 9.64a	51.11 ± 5.31a
	C	1.34 ± 0.30b	101.07 ± 15.37a	14.35 ± 5.16a	32.64 ± 6.37a	46.99 ± 5.74a
	均值 Average	1.17	117.19	16.36	33.98	50.34
S2	A	1.09 ± 0.34ab	141.03 ± 22.69a	10.25 ± 2.14b	45.56 ± 3.56a	55.81 ± 5.46a
	B	1.35 ± 0.17a	106.08 ± 20.75a	6.95 ± 1.34c	37.49 ± 5.37a	44.43 ± 4.93b
	C	1.43 ± 0.42ab	105.47 ± 17.64a	9.40 ± 2.93b	33.65 ± 7.33a	43.06 ± 4.06a
	均值 Average	1.29	117.53	8.87	38.87	47.76
S3	A	1.15 ± 0.21ab	62.26 ± 8.67d	18.95 ± 3.51a	29.78 ± 8.11c	50.08 ± 5.05b
	B	1.22 ± 0.18ab	33.79 ± 6.05d	20.52 ± 4.34a	29.56 ± 6.24a	48.73 ± 5.05ab
	C	1.39 ± 0.16ab	22.50 ± 4.53c	12.38 ± 3.74ab	30.51 ± 6.77a	42.89 ± 3.51a
	均值 Average	1.25	39.52	17.28	29.95	47.21
S4	A	1.21 ± 0.23a	106.43 ± 14.36b	15.34 ± 4.47a	35.61 ± 8.13b	50.95 ± 5.62b
	B	1.31 ± 0.20a	94.36 ± 13.28b	10.85 ± 2.24b	34.28 ± 9.99a	45.13 ± 4.24b
	C	1.79 ± 0.15a	99.05 ± 11.59a	7.63 ± 2.17bc	29.97 ± 3.31a	37.60 ± 2.32b
	均值 Average	1.44	99.95	11.27	33.29	44.56
S5	A	1.22 ± 0.17a	89.05 ± 14.67c	16.94 ± 3.10a	33.03 ± 7.16bc	49.96 ± 5.61b
	B	1.45 ± 0.28a	73.31 ± 10.17c	11.73 ± 3.31b	35.30 ± 7.77a	47.03 ± 5.84ab
	C	1.55 ± 0.22ab	76.48 ± 11.26b	9.39 ± 1.72b	33.86 ± 7.99a	43.25 ± 4.23a
	均值 Average	1.4	79.61	12.69	34.06	46.75
S6	A	0.87 ± 0.17c	146.32 ± 24.35a	13.36 ± 3.73ab	36.50 ± 10.46b	49.86 ± 5.88b
	B	1.13 ± 0.16b	108.37 ± 11.37a	17.38 ± 4.93a	32.50 ± 8.00a	49.88 ± 4.67a
	C	1.43 ± 0.21ab	82.60 ± 16.21b	15.44 ± 3.95a	30.82 ± 6.94a	46.25 ± 5.53a
	均值 Average	1.14	112.43	15.39	33.27	48.66

S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土。A: 腐殖质; B: 淀积层; C: 母质层。表中数据为平均值 ± 标准误差, 同一土层不同土壤类型差异显著用不同小写字母表示 ($P < 0.05$)。

S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil. A: Humus; B: Deposition layer; C: Parent material layer. Values in parentheses are mean ± SE. Different lowercase letters in the same soil layer and different soil types mean significant difference at 0.05 level.

表3 不同土壤类型土壤持水量
Table 3 Soil water holding capacity in different soil types

土壤类型 Soil type	土层 Soil layer	自然贮水量 Natural storage capacity (h/mm)	最大持水量 Maximum water capacity (h/mm)	毛管持水量 Capillary water capacity (h/mm)	非毛管持水量 Non-capillary water capacity (h/mm)	田间持水量 Field water capacity (h/mm)	涵养降水量 Available soil water storage (h/mm)
S1	A	29.91 ± 8.24a	108.88 ± 10.44a	81.30 ± 13.05b	27.58 ± 3.18bc	78.04 ± 13.59b	78.97 ± 7.99c
	B	25.92 ± 6.46bc	162.90 ± 11.93a	97.38 ± 18.91b	65.51 ± 6.94a	89.51 ± 12.32c	136.98 ± 18.55a
	C	44.57 ± 7.82a	253.69 ± 18.71a	175.12 ± 13.18a	78.49 ± 5.79a	163.97 ± 23.92a	209.12 ± 23.28a
	均值 Average	33.47	175.16	117.96	57.19	110.51	141.69
S2	A	29.92 ± 4.37b	119.04 ± 10.92a	96.60 ± 7.11a	22.44 ± 2.28c	91.99 ± 7.15a	89.12 ± 11.70b
	B	29.95 ± 9.53b	137.68 ± 10.79b	115.99 ± 6.12a	21.68 ± 2.02d	112.03 ± 17.42a	107.73 ± 16.44d
	C	29.93 ± 6.38b	190.19 ± 20.31c	142.73 ± 9.18d	47.46 ± 6.26c	128.65 ± 18.65c	160.26 ± 16.17d
	均值 Average	29.93	148.97	118.44	30.53	110.89	119.03
S3	A	12.59 ± 2.86b	101.40 ± 10.09a	59.69 ± 6.21c	41.71 ± 5.68a	55.87 ± 6.77d	88.81 ± 11.02b
	B	20.06 ± 5.01c	154.95 ± 14.16a	90.22 ± 8.73c	64.73 ± 4.01a	80.12 ± 10.75d	134.89 ± 17.62a
	C	19.29 ± 3.70c	217.63 ± 22.55b	154.14 ± 15.17bc	63.49 ± 5.40b	144.80 ± 13.99b	198.34 ± 25.88b
	均值 Average	17.31	158	101.35	56.65	93.62	140.68
S4	A	7.43 ± 1.61c	106.72 ± 11.25a	75.13 ± 6.26bc	31.59 ± 4.94bc	68.59 ± 8.38c	99.29 ± 17.62a
	B	10.64 ± 1.44e	137.59 ± 17.75b	105.24 ± 9.95b	32.35 ± 3.74c	101.85 ± 11.01ab	126.95 ± 15.70b
	C	7.15 ± 3.43d	189.65 ± 11.60c	151.41 ± 17.36c	38.24 ± 5.86d	146.85 ± 16.51b	182.50 ± 10.42c
	均值 Average	8.41	144.66	110.6	34.06	105.76	136.25
S5	A	12.95 ± 2.97b	102.39 ± 11.24a	67.97 ± 4.33c	34.42 ± 4.20b	62.82 ± 5.89c	89.44 ± 14.92b
	B	15.83 ± 4.47d	149.84 ± 13.52a	112.69 ± 13.30a	37.15 ± 4.94c	108.34 ± 13.23a	134.01 ± 12.80a
	C	20.09 ± 2.13c	223.67 ± 26.13b	175.96 ± 10.46a	47.71 ± 8.61c	169.24 ± 17.92a	203.58 ± 22.92ab
	均值 Average	16.29	158.63	118.87	39.76	113.47	142.34
S6	A	28.94 ± 6.19a	102.10 ± 13.76a	75.03 ± 10.93bc	27.07 ± 2.46c	68.14 ± 5.86c	73.16 ± 9.74c
	B	39.13 ± 9.19a	153.73 ± 17.01a	101.24 ± 13.97b	52.49 ± 4.80b	94.89 ± 14.42b	114.60 ± 10.74c
	C	23.68 ± 4.27bc	239.55 ± 27.66b	160.28 ± 15.93b	79.27 ± 9.75a	146.74 ± 12.64b	215.87 ± 26.17a
	均值 Average	30.58	165.13	112.18	52.95	103.26	134.55

S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土。A: 腐殖质; B: 淀积层; C: 母质层。表中数据为平均值 ± 标准误差, 同一土层不同土壤类型差异显著用不同小写字母表示 ($P < 0.05$)。

S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil. A: Humus; B: Deposition layer; C: Parent material layer. Values in parentheses are mean ± SE. Different lowercase letters in the same soil layer and different soil types mean significant difference at 0.05 level.

> S6 (52.95 mm) > S5 (39.76 mm) > S4 (34.06 mm) > S2 (30.53 mm) ; A层为S3最大 (41.71 mm) , S2最小 (22.44 mm) , B层S1最大 (65.51 mm) , S2最小 (21.68 mm) , C层则表现为S6最大 (79.27 mm) , S4最小 (38.24 mm) . 0-100 cm土层不同土壤类型田持水量表现为S5 (113.47 mm) > S2 (110.89 mm) > S1 (110.51 mm) > S4 (105.76 mm) > S6 (103.26 mm) > S3 (93.62 mm) . 涵蓄降水量表现为S5 (142.34 mm) > S1 (141.69 mm) > S3 (140.68 mm) > S4 (136.25 mm) > S6 (134.55 mm) > S2 (119.03 mm) , 6种土壤类型随土层深度变化毛管持水量、非毛管水量、田间持水量、涵蓄降水量规律一致, 均随土层加深增加.

3.3 不同土壤类型水分入渗能力

表4可知, 6种类型土壤的初渗速率大于稳渗速率, 且不同土壤类型间初渗速率存在显著差异. 0-100 cm土层土壤初渗速率表现为S6 (22.23 mm/min) > S1 (22.14 mm/min) > S3 (17.18 mm/min) > S5 (6.60 mm/min) > S2 (6.37 mm/min) > S4 (2.09 mm/min) ; 稳渗速率表现为S6 (12.22 mm/min) > S3 (11.24 mm/min) > S1 (9.89 mm/min) > S2 (4.14 mm/min) > S5 (3.23 mm/min) > S4 (1.30 mm/min) , 其中S6、S1、S3这3种类型的土壤初渗率和稳渗速率均显著高于其他3种土壤; S4土壤的初渗速率和稳渗速率最小, 分别为2.09和1.30 mm/min. 结合表4和图2可知, 入渗速率随着时间的延长趋于稳定, 60 min入渗速率趋于稳定, 达到稳渗状态, 土壤入渗速率与时间呈幂函数关系, 且6个方程比较接近于常用于描述土壤入

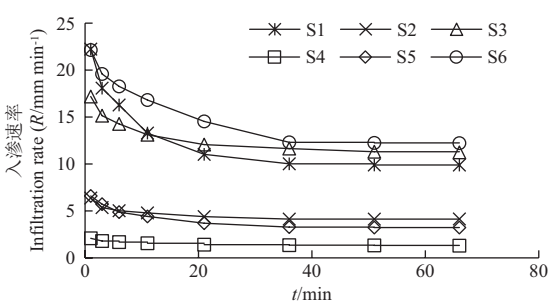


图2 不同土壤类型土壤入渗曲线. S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土.
Fig. 2 Soil infiltration curve of different soil types. S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil.

渗过程的模型考斯加柯夫公式 ($f = a \times t$; 式中, f 、 a 、 t 分别为入渗速率、常数和时间) [20].

3.4 不同土壤类型孔隙特征与持水量相关性

由表5相关性分析可知, 土壤容重与稳渗速率、总孔隙度呈显著负相关; 而稳渗速率与土壤总孔隙度呈显著正相关; 土壤有机碳含量与毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量呈显著正相关, 有机碳含量越高, 土壤结构相对较好, 透水透气性越好; 总孔隙度与最大持水量呈显著正相关关系, 毛管持水量与田间持水量呈极显著正相关关系, 非毛管持水量与最大持水量呈显著正相关关系.

表4 不同土壤类型土壤渗透速率及渗透模型
Table 4 Permeation rate and permeability model of soil in different soil types

土壤类型 Soil type	初渗速率 Initial infiltration rate (R/mm min ⁻¹)	稳渗速率 Infiltration rate (R/mm min ⁻¹)	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient (R ²)
S1	22.23a	9.89a	$y = 17.571x^{-0.1531}$	0.6489
S2	6.37b	4.14b	$y = 5.4103x^{-0.0254}$	0.6112
S3	17.18a	11.24a	$y = 15.559x^{-0.0806}$	0.8177
S4	2.09c	1.30b	$y = 1.7931x^{-0.0096}$	0.6745
S5	6.60b	3.23b	$y = 5.4406x^{-0.0436}$	0.6908
S6	22.14a	12.22a	$y = 19.822x^{-0.146}$	0.8098

S1: 亚高山草甸土; S2: 高原草甸土; S3: 暗棕壤; S4: 棕壤; S5: 黄棕壤; S6: 褐土.
S1: Subalpine meadow soil; S2: Plateau meadow soil; S3: Dark brown soil; S4: Brown soil; S5: Yellow brown soil; S6: Cinnamon soil.

4 讨论

4.1 不同森林土壤类型孔隙特征及其影响因素

川西北高山/亚高山是我国主要水源涵养区, 由于自然因素和长期不合理的生产活动, 森林过量采伐, 土壤水源涵养功能降低, 水土流失严重, 导致生态环境十分脆弱. 土壤类型其物理性质的差异影响土壤中水分移动、土壤表层径流、土壤渗透性能、养分储存及循环等过程 [21], 从而影响生态系统水文过程. 土壤孔隙度及容重能够反映通气状况和紧实程度, 本研究中6种土壤类型容重均表现为随土层加深而增加的规律, 但土壤毛管孔隙度和总孔隙度则随土层加深表现为降低的规律; 非毛管孔隙是土壤水分快速运动通道, 其下

表5 不同森林土壤类型孔隙特征与持水量相关性
Table 5 Correlation of soil physical properties and water retention in different soil types

土壤特征 Soil property	容重 Bulk density	有机碳 Organic matter	稳渗速率 Infiltration rate	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	总孔隙度 Total porosity	毛管持水量 Capillary water holding capacity	非毛管持水量 Non-capillary water holding capacity	田间持水量 Field water capacity	最大持水量 Maximum water holding capacity
容重	1									
有机碳	-0.22	1								
稳渗速率	-0.814*	0.619	1							
非毛管孔隙度	-0.609	-0.435	0.046	1						
毛管孔隙度	0.098	0.725*	0.482	-0.807	1					
总孔隙度	-0.877*	0.347	0.793*	0.480	0.130	1				
毛管持水量	0.071	0.738*	0.367	-0.508	0.785	0.312	1			
非毛管持水量	-0.745	-0.297	0.232	0.981**	-0.683	0.633	-0.410	1		
田间持水量	0.267	0.668*	0.167	-0.574	0.741	0.136	0.977**	-0.511	1	
最大持水量	-0.760	0.136	0.477	0.745	-0.252	0.876*	0.175	0.826*	0.053	1

*P < 0.05; **P < 0.01.

渗速率远高于毛管孔隙,非毛管孔隙度越大越有利于土壤水分下渗运动,更加有利于涵养水源,本研究表明亚高山草甸土的非毛管孔隙度最高,土壤透气性和透水性较好,能够有效减少地表径流,促进土壤的水源涵养;不同土壤类型间孔隙状况均存在显著差异,本研究区土壤类型均分布于1 300-3 500 m的海拔范围内,人为干扰对土壤紧实度的影响相对较少,因此,说明土壤类型的差异对土壤孔隙状况具有显著作用。本研究与庞梦丽等^[22]和鲁绍伟等^[23]的研究结果一致,由于深层土壤团聚体的团聚性相对较小,紧实程度则较大;本研究中土壤有机碳含量和土壤孔隙度、毛管孔隙度呈正相关,是因为有机碳结合土壤颗粒,促进了土壤团粒结构的形成,影响土壤孔隙状况,使其通透性增加,利于土壤水分入渗,同时,不同土壤类型其植被组成、表层枯落物分解程度及地下根系的生长状况差异较大,造成土壤有机碳含量积累及孔隙状况的差异。

4.2 不同森林土壤类型贮蓄水能力的影响因素

土壤水分是森林生态系统物质循环过程的重要载体,能够调节土壤养分和能量分配格局,对地表径流产生、生态系统蒸散过程、水分循环及平衡具有重要意义^[24]。本研究中自然贮水量、最大持水量均表现为亚高山草甸土显著高于其余5种土壤类型,亚高山草甸土海拔较高,土壤湿度过大,水分会充塞大部分土壤孔隙,使通气受阻,有机质矿化率低,故有利于有机质的积累和保存,由于海拔的变化影响土壤温度和土壤水分的变化,这也就解释了本研究前述,除褐土外,其余5种土壤类型表现为有机碳含量随海拔的升高而升高,高海拔地区的高原草甸土和高山草甸土表层土壤有机质分解较为缓慢,较易积累,以及6种土壤类型土壤有机碳含量和毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量呈显著正相关这一结果。在样地调查中,褐土由针阔混交林组成,林分结构良好,土壤表层枯落物积累丰富,有机碳积累也较为丰富。土壤最大持水量可反映土壤在雨季时最大的持水能力,而毛管持水量可近似认为土壤在枯水季节的贮水量^[25],土壤的贮水量越小,不利于水源涵养,当降雨量达到一定程度就会产生地表径流,造成水土流失,由本研究结果可知,在雨季时,亚高山草甸土所持蓄的降水量高于其他类型土壤,说明亚高山草甸土类型的土壤更有利于降水的贮蓄,能够有效减少地表径流,水土保持功能较优;而在枯水期是黄棕壤贮蓄的水量高于其他类型土壤。

4.3 不同森林土壤类型水分入渗能力分析及其相关性关系

本研究中6种土壤类型入渗速率随着时间的延长趋于稳定,60 min以后达到稳渗状态,均表现为土壤入渗速率与时间呈幂函数关系,接近于考斯加柯夫公式^[20]。褐土对于降水的入渗以及贮藏能力最强,而棕壤对于降水的入渗以及贮藏能力最弱,亚高山草甸土在相同时间内对于降雨的入渗以及吸持能力要高于其他几种土壤,棕壤则表现为入渗的降水量最小,其原因是一定时间内土壤的入渗速率越高,渗入土壤中的降水保存量越多,地表径流的损失就越少,水土就越不易流失。喻明美等等研究表明,土壤入渗速率与入渗时间关系的模型一致,土壤初渗速率、稳渗速率和平均渗透率的大小受其他物理性状的影响,分别与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度呈极显著正相关关系,与容重呈显著负相关^[26],本研究

中稳渗速率与土壤总孔隙度呈显著正相关,与上述研究结果一致。由本研究结果可知,改善该区域不同土壤类型条件下水文及物理性质可从两方面开展,一方面有机碳的积累改善土壤结构,使土壤孔隙度升高,土壤透气透水性提高;另一方面通过不同土壤类型水文效应的影响因素结果可知,对适应不同土壤类型的林草措施要“适地适树”,从而达到提高土壤水源涵养、保持水土的目的,实现区域生态服务功能。

5 结论

(1) 有机碳含量表现为高原草甸土>亚高山草甸土>褐土>棕壤>黄棕壤>暗棕壤;随着土层加深逐渐减小;A、B层褐土最高,暗棕壤最低,C层则表现为高原草甸土最高,暗棕壤最低。6种土壤类型容重为0.87-1.79 g/cm³,表现为棕壤>黄棕壤>高原草甸土>暗棕壤>亚高山草甸土>褐土;从不同土层深度,其规律与有机碳含量相反;总孔隙度在37.6%-55.81%之间。

(2) 0-100 cm土层自然贮水量、最大持水量、非毛管持水量表现为亚高山草甸土最高;田间持水量、涵养降水量则表现为黄棕壤最高;最大持水量、毛管持水量、非毛管水量、田间持水量、涵养降水量均表现为随土层加深而增加。

(3) 6种土壤类型均表现为初渗速率大于稳渗速率,且不同土壤类型间初渗速率存在显著差异,土壤入渗速率与时间呈幂函数关系,接近于考斯加柯夫公式。

(4) 本研究中土壤有机碳含量与毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量呈显著正相关,土壤有机碳能够改善土壤结构,促进其通气透水性;总孔隙度、非毛管持水量和最大持水量呈显著正相关关系,土壤孔隙度状况显著影响水文效应特征。

生态系统水源涵养能力取决于植被冠层截留量、地被物截留量、土壤蓄水量及渗透能力,本研究只对不同土壤类型孔隙状况和持水蓄水性能进行了研究,还需要进一步探讨地上植被和地被物的影响及其影响因素。综合来看,本研究结果回答了前述的科学问题,川西北高山/亚高山区域土壤类型的土壤孔隙度及水文效应存在显著差异,高原草甸土、亚高山草甸土、褐土水源涵养功能优于其余3种土壤类型,尤其是最大持水量、非毛管持水量及渗透速率的作用最明显,土壤水源涵养功能维持着川西北高山/亚高山区域生态系统的稳定。

参考文献 [References]

- 1 赵建生,王永明,杨新兵.冀北山地森林土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2013,20(3):201-205 [Zhao JS, Wang YM, Yang XB. Study on hydrological effect of forest soil in mountain area of northern Hebei Province [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2013, 20(3): 201-205]
- 2 Piayda A, Dubbert M, Siegwolf R, Cuntz M., Werner C. Quantification of dynamic soil-vegetation feedbacks following an isotopically labelled precipitation pulse [J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(9): 2293-2306
- 3 Buytaert W, Wyseure G, De Bièvre B, Deckers J. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in South Ecuador [J]. *Hydrol Process*, 2005, 19(20): 3985-3997
- 4 Hu XM, Xue M, Mcpherson RA. The importance of soil-type contrast

- in modulating august precipitation distribution near the Edwards Plateau and Balcones Escarpment in Texas [J]. *J Geophys Res*, 2017, **122** (20): 10711-10728
- 5 姜海燕, 赵雨森, 陈祥伟, 李为海, 朱万昌, 吕文博. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21** (3): 149-153 [Jiang HY, Zhao YS, Chen XW, Li WH, Zhu WC, Lü WB. Study on soil hydrological function of several main forest types in south of the Five Ridges, Greater Khingan Range [J]. *J Soil Water Convers*, 2007, **21** (3): 149-153]
 - 6 武启骞, 王传宽, 赵娟, 窦佳. 帽儿山2种森林类型凋落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2015, **29** (3): 161-166 [Wu QQ, Wang CK, Zhao J, Dou J. Hydrological effects of litter and soil in two forest types in Mt er Mountain [J]. *J Soil Water Convers*, 2015, **29** (3): 161-166]
 - 7 张学龙, 成彩霞, 敬文茂, 苗毓鑫, 罗龙发. 祁连山森林土壤的水文生态效应[J]. 甘肃林业科技, 2007, **32** (2): 5-9 [Zhang XL, Cheng CX, Jin WM, Miao YT Luo LF. The hydrological and ecological effects of forest soil in Qilian Mountains [J]. *J Gansu For Sci Technol*, 2007, **32** (2): 5-9]
 - 8 丛日亮, 张金池, 黄进, 王如岩, 王荣娟, 陈莉莎. 苏南丘陵区主要林分类型土壤水文效应[J]. 亚热带水土保持, 2010, **22** (4): 13-17 [Cong RL, Zhang JC, Huang J, Wang RY, Wang RJ, Chen LS. Soil hydrological effect of the main forest types in the hilly region of South Jiangsu Province [J]. *Subtrop Soil Water Convers*, 2010, **22** (4): 13-17]
 - 9 Rachman A, Anderson SH, Gantzer CJ, Thompson AL. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration [J]. *Sol Sci Am J*, 2004, **68** (6): 2000-2006
 - 10 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 刘立杰, 王月海. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J]. 水土保持学报, 2009, **23** (1): 173-176 [Xu JW, Li CR, Xia JB, Liu LJ, Wang YH. Soil hydrological characteristics of different forest types in the the Yellow River Delta [J]. *J Soil Water Convers*, 2009, **23** (1): 173-176]
 - 11 刘瑞龙, 杨万勤, 吴福忠, 谭波, 王文君. 川西亚高山/高山森林凋落物分解过程中土壤动物群落结构及其多样性动态[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (3): 499-507 [Liu RL, Yang WQ, Wu FZ, Tan B, Wang WJ. Soil fauna community structure and diversity during foliar litter decomposition in the subalpine/alpine forests of western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (3): 499-507].
 - 12 周义贵, 郝凯婕, 李贤伟, 范川, 陈栋霖, 王谢, 王晓红. 川西亚高山不同土地利用类型对土壤微生物量碳动态特征的影响[J]. 自然资源学报, 2014, **29** (11): 1944-1956 [Wang YG, Hao KJ, Li XW, Fan C, Chen LL, Wang X, Wang XH. Effects of different land use types on dynamic characteristics of soil microbial biomass carbon in western Sichuan [J]. *J Nat Resour*, 2014, **29** (11): 1944-1956]
 - 13 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 余胜, 杨玉莲, 王奥. 冻融末期川西亚高山/高山森林土壤水解酶活性特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22** (5): 1162-1168. [Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Yu S, Yang YL, Wang A. Soil hydrolase characteristics in late soil-thawing period in subalpine / alpine forests of West Sichuan [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22** (5): 1162-1168]
 - 14 肖洒, 吴福忠, 杨万勤, 常晨晖, 李俊, 王滨, 曹艺. 川西高山森林生态系统林下生物量及其随林窗的变化特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23** (9): 1515-1519 [Xiao S, Wu FZ, Yang WQ, Chang CH, Li J, Wang B, Cao Y. Understory biomass and its characteristics as affected by forest gap in the alpine forest ecosystem in west Sichuan [J]. *Ecol Environ*, 2014, **23** (9): 1515-1519]
 - 15 张远东, 刘世荣, 罗传文, 张国斌, 马姜明. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征[J]. 生态学报, 2009, **29** (2): 627-635 [Zhang YD, Liu SR, Luo CW, Zhang GB, Ma JM. Water holding capacity of ground covers and soils in different land uses and land covers in subalpine region of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (2): 627-635]
 - 16 张远东, 刘世荣, 马姜明, 史作民, 刘兴良. 川西亚高山桦木林的林地水文效应[J]. 生态学报, 2005, **25** (11): 2939-2946 [Zhang YD, Liu SR, Ma JM, Shi ZM, Liu XL. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (11): 2939-2946]
 - 17 刘洋, 张健, 杨万勤, 吴福忠, 黄旭, 闫邦国, 文维全, 胡开波. 川西高山树线群落交错带地被物及土壤的水文效应[J]. 林业科学, 2011, **47** (3): 1-6 [Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Wu FZ, Huang X, Yan BG, Wen WQ, Hu KB. Ground coverage and soil hydrological action of alpine treeline ecotone in western Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47** (3): 1-6]
 - 18 张万儒, 杨光滢, 屠星南. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000 [Zhang WR, Yang GY, Tu XN. Forest Soil Analysis Method [M]. Beijing: China Standard Press, 2000]
 - 19 田超, 杨新兵, 李军, 鲁绍伟, 刘阳, 毕可姣. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, **25** (4): 221-226 [Tian C, Yang XB, Li J, Lu SW, Liu Y, Bi KJ. Hydrological effects of litter and soil in *Quercus aquacu* forests at different altitudes in northern Hebei [J]. *J Soil Water Convers*, 2011, **25** (4): 221-226]
 - 20 Vanani HR, Shayannejad M, Tudeschi ARS. Development of a new method for determination of infiltration coefficients in furrow irrigation with natural non-uniformity of slope [J]. *Sustain Water Res Manage*, 2017, **3** (2): 163-169
 - 21 Reynolds WD, Bowman BT, Drury CF. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters [J]. *Geoderma*, 2002, **110** (1): 131-146
 - 22 庞梦丽, 朱辰光, 翟博超, 屈宇. 河北省太行山区3种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持通报, 2017, **37** (1): 51-56 [Pang ML, Zhu CG, Zhai BC, Qu Y. Water-holding capacity of litter and soil in three kinds of soil and water conservation forests in Taihang Mountains of Hebei Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2017, **37** (1): 51-56]
 - 23 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 张玉平, 李少宁. 北京山地7种人工纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2013, **34** (5): 53-59 [Lu SW, Chen B, Pan QH, Zhang YP, Li SN. Hydrological effects of seven artificial pure forests litters and soil in mountains of Beijing [J]. *J Inner Mongolia Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2013, **34** (5): 53-59]
 - 24 Mauritsen T, Stevens B. Missing iris effect as a possible cause of muted hydrological change and high climate sensitivity in models [J]. *Nat Geosci*, 2016, **8** (5): 10.1038/ngeo2414
 - 25 柴亚凡, 王恩姮, 陈祥伟, 王庆祥, 周一杨. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22** (1): 60-64 [Chai YF, Wang EH, Chen XW, Wang QX, Zhou YY. Effect of vegetation restoration mode on water storage performance and water infiltration characteristics of black soil [J]. *J Soil Water Convers*, 2008, **22** (1): 60-64]
 - 26 喻明美, 谢正生. 广州市白云山五种森林类型的土壤渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2011, **18** (1): 153-156 [Yu MM, Xie ZS. Study on soil permeability of five forest types in Guangzhou Baiyun Mountain [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2011, **18** (1): 153-156]