

# 喀斯特地区不同林型土壤持水性分析

周秋文, 尤倩

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 森林是陆地上重要的生态系统类型,虽然喀斯特森林的面积相对较小,但其土壤的涵养水源功能对喀斯特地区水土保持和生态恢复仍具有重要意义。研究以贵州典型喀斯特林地为例,采用野外定点采样结合室内实验的方法,对不同林型下土壤的物理特性和持水特征进行分析。结果表明,喀斯特林地内土壤容重随着土层深度的增加而增大,而土壤的孔隙度随着土层深度的增加而减小。同为石灰土情况下,土壤容重的均值大小为针叶林 > 阔叶林 > 混交林,有效持水量的大小为阔叶林 > 混交林 > 针叶林。黄壤针叶林土壤容重小于石灰土针叶林,两种林型土壤孔隙度差异不明显。除毛管持水量外,其它持水能力指标黄壤针叶林均略大于石灰土针叶林。喀斯特林地土壤饱和的含水量很大程度上取决于土壤容重,毛管孔隙度对饱和的含水量的影响并不显著。

**关键词:** 森林; 土壤; 持水性; 喀斯特

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0226-06

## Analysis of water holding capacity of soil in different forest types in Karst region

ZHOU Qiuwen, YOU Qian

(School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Forest is an important type of ecosystem on land. Although the area of karst forest is relatively small, its soil water holding function is still important for soil and water conservation and ecological restoration in karst area. Taking the typical karst forest land in Guizhou as an example, the physical characteristics and water holding characteristics of soil under different forest types were analyzed by field sampling and laboratory experiment. The results show that the soil bulk density increases with the increase of the soil depth, while the soil porosity decreases with the increase of the soil depth. In the case of limestone soil, the order of the mean value of soil bulk density of different forest types from large to small is coniferous forest > broad-leaved forest > mixed forest, and the order of the effective water holding capacity of different forest types from large to small is broad-leaved forest > mixed forest > coniferous forest. The soil bulk density in coniferous forest growing on yellow soil was lower than that in coniferous forest growing on limestone soil, and the difference of soil porosity in the two forest types was not obvious. Most of the water holding capacity index in coniferous forest growing on yellow soil are slightly larger than that in coniferous forest growing on limestone soil coniferous forest, except the capillary water holding capacity. The maximum water holding capacity of karst forest depends largely on the soil bulk density, and the impact of capillary porosity on the maximum water holding capacity is not significant.

**Key words:** forest; soil; water holding capacity; Karst

## 1 研究背景

森林是陆地上重要的生态系统类型,在涵养水

源、保持水土和维持生态系统平衡方面具有重要的作用<sup>[1]</sup>。森林土壤是森林生态系统的重要组成部分,是地表植被生长和发育的基础。同时土壤也是

收稿日期:2017-08-01; 修回日期:2017-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41761003);贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2015]2118号);贵州省本科教学工程建设项目(2016DC3);贵州师范大学博士科研启动金项目

作者简介:周秋文(1986-),男,广西灵川人,博士,副教授,主要从事喀斯特生态水文过程研究。

森林生态系统水分的主要蓄库,它是森林涵养水源的关键<sup>[2-4]</sup>。土壤持水能力是土壤重要的物理性质,可作为评价土壤水分调节能力和涵养水源的重要指标,同时也是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[5]</sup>。因此,研究一定区域内森林类型与土壤持水性能的关系具有非常重要的意义。

近年来,许多研究者对森林土壤的持水性进行了大量研究工作,取得了一定成果<sup>[6-8]</sup>。吴春雷等采用室内浸水法对辽东地区主要植被类型土壤的持水性能进行动态的数学模拟研究,结果表明土壤的持水能力由土壤厚度和持水性能共同决定<sup>[9]</sup>。罗金明等对大兴安岭典型针阔混交林区土壤持水效应的研究表明,大兴安岭低山丘陵地区土壤的持水性受地貌条件的影响较大,发育的土壤类型以及植被都表现出典型的高寒森林湿地中域景观特征<sup>[10]</sup>。王燕等研究了不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能<sup>[11]</sup>。唐洪辉等研究了南亚热带杉木林改造对土壤及凋落物持水能力的影响<sup>[12]</sup>。上述研究分布于不同区域,具有一定的地域代表性,能反映出所研究森林土壤的持水特性<sup>[13]</sup>。但是,已有研究中,对喀斯特地区森林土壤持水性的研究较少<sup>[14-16]</sup>。近年来,喀斯特地区受自然条件的影响和人类社会经济活动的干扰,生态系统十分脆弱,面临着水土流失,土壤退化,石漠化等问题<sup>[17-19]</sup>。虽然喀斯特森林的面积相对较小,但喀斯特森林作为一种典型的森林类型,其土壤有一定的地域特色<sup>[20-21]</sup>。喀斯特森林土壤的涵养水源功能对喀斯特地区水土保持和生态恢复仍具有重要意义。

因此,本文以研究贵州典型喀斯特林地为例,采用野外定点采样结合室内实验的方法,以石灰土针叶林、阔叶林、混交林及黄壤针叶林为研究对象,对不同林型下土壤的物理特性和持水特征进行分析。以便为揭示喀斯特地区不同森林类型的土壤水文效

应提供参考。

## 2 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区(106°63'E, 26°38'N),平均海拔1 200 m,地处乌江与珠江分水岭,该区域地表破碎,以山地和丘陵为主,属于典型喀斯特地貌。气候类型为高原季风湿润气候,区内雨量充沛,无霜期长,湿度较大。年平均温度为15℃,平均雨量1 178 mm,无霜期平均246 d。土壤类型主要有石灰土和黄壤,植被带属中亚热带常绿阔叶林带,原生植被主要以常绿阔叶林为主,人类破坏后演替为次生林。

## 3 研究方法

### 3.1 样地设置及样品采集

在研究区内选取石灰土生长的针叶林、阔叶林、混交林及黄壤生长的针叶林4种林型典型地段,设置10 m×10 m的固定样地各1个,共计4个样地。测定样地基本特征,包括林木的胸径、树高、郁闭度、密度等指标(表1),其中胸径、树高、密度3项指标,仅测量高度为1.5 m以上的乔木。在树干距地面1.3 m处,采用皮尺量取树木胸径。如1.3 m处粗度异常,往上找出离1.3 m处最近的正常部位量取。如树木分枝点在1.3 m以下,则在分枝点下方量取胸径。采用直读式测高器,测量树木高度。采用林冠投影法原理,结合无人机垂直航拍影像,测定郁闭度。密度指标通过计算样地内高于1.5 m的乔木数量得出。针叶林I所处的地形为一个相对平缓的地段,发育的土壤类型为黄壤,主要乔木树种为马尾松,且长势较好,植株高大。针叶林II处海拔较针叶林I海拔略高,发育的土壤类型为石灰土,主要乔木树种为马尾松,从树高、郁闭度两项指标都体现出其长势较针叶林I略差。

表1 不同林型标准样地基本特征

森林	面积/m <sup>2</sup>	海拔/m	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度/%	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	土壤类型
针叶林I	10×10	1193.1	20.2	6.1	93	1970	黄壤
针叶林II	10×10	1204.6	16.1	5.6	90	2150	石灰土
阔叶林	10×10	1204.9	13.2	4.8	77	1740	石灰土
混交林	10×10	1204.5	14.4	5.1	87	1890	石灰土

注:针叶林I为黄壤、针叶林II为石灰土、阔叶林为石灰土、混交林为石灰土。

### 3.2 测定方法

土壤物理性质测定。在各标准样地内,选择具有代表性的样点,设置3个30 cm×30 cm的小样

方。同时,在每个标准样地中,依次向下挖取土壤剖面,划分为4层(10 cm为一层),用环刀采取原始土样,带回实验室,测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙

度、非毛管孔隙度等土壤物理性质<sup>[22]</sup>。

用环刀法测定土壤容重。采用 100 cm<sup>3</sup> 的环刀在选定的小样方内直接取得各层处于自然状态的土壤,使土壤恰好充满环刀。然后称量并根据土壤自然含水量计算每单位体积的烘干土重,即得土壤容重。计算公式如下:

$$G = \frac{G'}{V} \quad (1)$$

式中:  $G$  为土壤容重, g/cm<sup>3</sup>;  $G'$  为烘干土重, g;  $V$  为环刀体积, cm<sup>3</sup>。

土壤总孔隙度通过测定的土壤容重结果,再与土壤比重通过计算得出。

$$p_1 = \left(1 - \frac{G}{G_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中:  $p_1$  为土壤总孔隙度, %;  $G_f$  为土壤比重, 通过比重瓶法测定。

毛管( $p_2$ ) 与非毛管( $p_3$ ) 孔隙度测定。取瓷盘一个, 盘中倒放一培养皿, 培养皿上放滤纸一张, 稍大于培养皿, 将环刀连同所取土柱放于其上。向瓷盘中加水, 并使滤纸边缘接触水面。使土柱通过滤纸吸水, 待土壤毛管全部充满水分时为止。取出环刀将吸水膨胀而超出环刀的湿土用小刀切去, 连同湿土柱称重, 再除出环刀重量即为充满毛管水的湿土重( $G_1$ )。从环刀上部取出土样 10 ~ 20 g, 置铝盒中烧失, 测其含水百分数, 计算出环刀内的干土重( $G_2$ )。

$$p_2 = \frac{G_1 - G_2}{V} \times 100 \quad (3)$$

$$p_3 = p_1 - p_2 \quad (4)$$

土壤持水性能测定。用环刀浸泡法测定土壤饱和含水量、有效持水量及毛管持水量指标<sup>[23]</sup>。

$$C_1 = 10000h \cdot p_1 \quad (5)$$

$$C_2 = 10000h \cdot p_2 \quad (6)$$

$$C_3 = 10000h \cdot p_3 \quad (7)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为饱和含水量, t/hm<sup>2</sup>、有效持水量、毛管持水量;  $h$  为土壤厚度, m。

## 4 结果与分析

### 4.1 不同林型土壤容重

土壤容重可以反映土壤的透水性和通气性的大小, 土壤容重小, 表明土壤疏松多孔, 结构性良好<sup>[10]</sup>。土壤疏松多孔有利于水分的下渗与储存, 表明土壤容重小, 土壤涵养水源能力强。在 0 ~ 40 cm 的土层中, 从土壤表层到土壤深层, 总体上 4 种林分的土壤容重均表现为随土壤深度的增加而增加(图 1(a))。这是由于土壤表层是枯落物的分解物质, 黏粒含量较少。随着土壤深度的加深, 有机质含量降低, 加上降雨时雨水对土壤的淋溶和淀积作用, 使得深层的黏粒含量增加, 土壤变得紧实。到达 30 cm 深度后, 土壤容重增幅减缓, 趋于稳定。表明在喀斯特地区土壤剖面中, 仅土壤表层较为疏松, 团粒结构较好。黄壤针叶林的土壤容重在土壤表层随深度的增加较明显, 但是到达 20 cm 深度后, 土壤容重增幅减小。石灰土针叶林和混交林下的土壤容重则是在 30 cm 深度开始趋于稳定。从 0 ~ 40 cm 深度, 阔叶林下的土壤容重呈稳定增加的趋势(图 1(a))。4 种林型中, 石灰土针叶林的土壤容重随深度增加的增幅最大, 由 0 ~ 10 cm 的 0.61 g/cm<sup>3</sup> 增长到 30 ~ 40 cm 的 1.15 g/cm<sup>3</sup>, 增加了 0.89 倍。0 ~ 40 cm 土壤深度内, 各林型的平均土壤容重差异不是很大, 标准差为 0.05 g/cm<sup>3</sup>。石灰土生长的 3 种林型在 0 ~ 40 cm 的深度内, 土壤容重的均值表现为针叶林(1.15 g/cm<sup>3</sup>) > 阔叶林(1.05 g/cm<sup>3</sup>) > 混交林(1.02 g/cm<sup>3</sup>), 其中石灰土针叶林的土壤容重均值最大(图 1(b))。同为针叶林, 黄壤针叶林的土壤容重均值为 1.06 g/cm<sup>3</sup>, 小于石灰土针叶林(1.15 g/cm<sup>3</sup>)。两种针叶林在 0 ~ 20 cm 的容重相差不多, 但在 20 ~ 40 cm 石灰土针叶林的容重比黄壤针叶林高。总体而言, 黄壤针叶林土壤容重随深度变化最为稳定, 石灰土针叶林土壤容重最大。

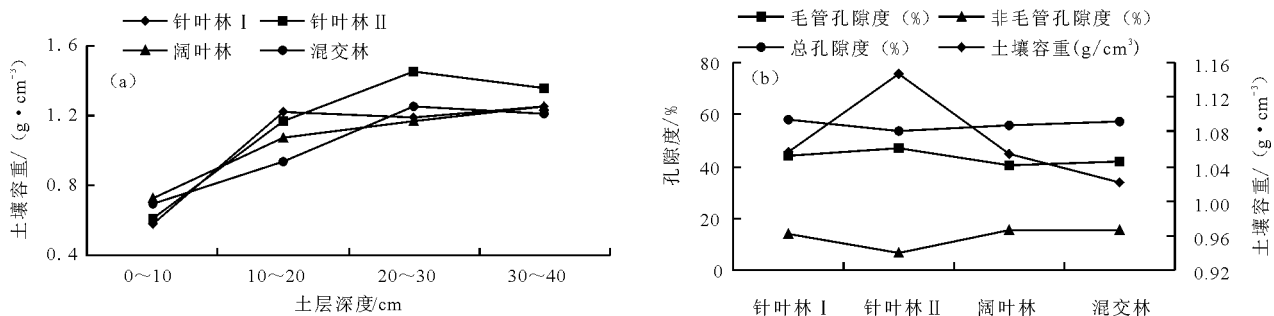


图 1 不同林型土壤物理性状

### 4.2 不同林型土壤孔隙度

由图 2 可知,各林分在 0~40 cm 的土层中,由土壤表层到土壤深层,孔隙度总体呈减小趋势。此变化规律与土壤容重的变化规律相反,表明随着土壤深度的增加,土壤颗粒间空隙变小,土壤紧实度增加。与毛管孔隙度和总孔隙度相比,非毛管孔隙度随深度减小的趋势较为明显。其中最明显的是黄壤针叶林,非毛管孔隙度从表层到深层减小了 34.6%,标准差为 15.4%。与非毛管孔隙度和总孔隙度相比,毛管孔隙度随土层深度减小的趋势不明显。其中黄壤针叶林毛管孔隙度随土层深度增加呈现小幅上升趋势,阔叶林毛管孔隙度随土层深度增加的变化不大(图 2(a))。上述分析表明,随着深度增加,黄壤针叶林下土壤毛管孔隙度与非毛管孔隙度变化趋势相反。主要原因可能是,总体而言黄壤中黏粒较多,随深度增加土壤变得紧实,土粒间的空隙变小,因此非毛管孔隙度随深度增加显著减小,而土粒间空隙变小会导致毛管孔隙度增加。

混交林非毛管孔隙度的变化趋势异常,10~20 cm 深度的非毛管孔隙度高于其它深度,可能是由于实验误差造成的(图 2(b))。同为石灰土情况下,土壤毛管孔隙度均值排序为针叶林(46.98%)>混交林(41.79%)>阔叶林(40.41%)(图 2(a))。非毛管孔隙度均值表现为阔叶林(15.70%)>混交林(15.31%)>针叶林(6.47%)(图 2(b)),阔叶林与混交林毛管孔隙度的数值相似,针叶林则比二者小得多。土壤持水量混交林最大,为 570.95 t/hm<sup>2</sup>;阔叶林与混交林相当,为 561.10 t/hm<sup>2</sup>;针叶林最小,为 534.51 t/hm<sup>2</sup>。由此可以推测出非毛管孔隙度与土壤持水能力密切相关,而且两者大致呈正相关的关系。同为针叶林情况下,毛管孔隙度在 0~20 cm 的土层中石灰土大于黄壤,在 20~40 cm 的土层中则黄壤大于石灰土;在各个土层深度上,黄壤的非毛管孔隙度均大于石灰土;在 0~20 cm 的土层中黄壤与石灰土的总孔隙度大体一致,在 20~40 cm 的土层中则石灰土大于黄壤。

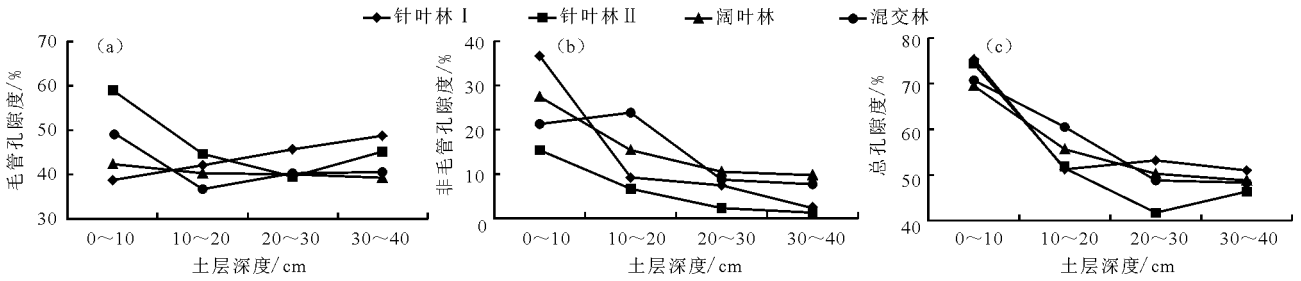


图 2 不同林型土壤孔隙度

### 4.3 不同林型土壤持水能力

由图 3 可知,不同林型土壤自然含水率存在一定差异,同为石灰土情况下,自然含水率大小为针叶林(30.86 t/hm<sup>2</sup>)>混交林(27.47 t/hm<sup>2</sup>)>阔叶林(25.61 t/hm<sup>2</sup>)(图 3(a));毛管持水率的大小为针叶林(48.91%)>混交林(44.15%)>阔叶林(40.27%);有效持水量的大小为阔叶林(157.04 t/hm<sup>2</sup>)>混交林(153.08 t/hm<sup>2</sup>)>针叶林(64.67 t/hm<sup>2</sup>)(图 3(b)),说明阔叶林土壤持水能力最强,推断原因是阔叶林土壤枯落物比针叶林多,有机质含量高,非毛管孔隙度大,

有利于降水下渗和贮存;饱和的含水量的大小为混交林(570.95 t/hm<sup>2</sup>)>阔叶林(561.1 t/hm<sup>2</sup>)>针叶林(534.51 t/hm<sup>2</sup>)。不同土壤类型情况下,黄壤针叶林自然含水率(32.7%)略大于石灰土针叶林(30.8%);黄壤针叶林毛管持水量(44.8%)小于石灰土针叶林(48.91%);黄壤针叶林有效持水量(139.29 t/hm<sup>2</sup>)大于石灰土针叶林(64.67 t/hm<sup>2</sup>),黄壤针叶林饱和的含水量(576.68 t/hm<sup>2</sup>)大于石灰土针叶林(534.51 t/hm<sup>2</sup>)(图 3(b))。上述持水性指标对比说明,黄壤针叶林比石灰土针叶林土壤持水能力强。

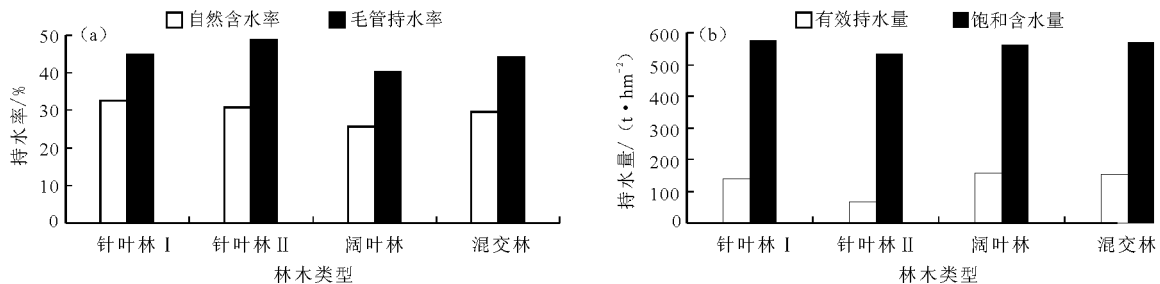


图 3 不同林型土壤持水性

#### 4.4 土壤物理性质与饱和含水量关系

饱和的含水量是衡量森林土壤持水性能的重要指标。将土壤饱和的含水量与土壤物理性质指标进行相关分析(见图4),有利于理解土壤物理性质对土壤持水能力的作用机制。结果表明,饱和的含水量与土壤容重 $R^2$ 为0.99,呈显著负相关关系,且相关程度非常高,说明喀斯特森林中土壤容重对土壤持水性能的影响非常大(图4(a))。饱和的含水量与毛管孔隙度的 $R^2$ 为0.15,二者之间相关性较小(图4(b)),说明在喀斯特森林中,毛管孔隙度对土壤持水性能的影响不大。饱和的含水量与非毛管孔隙度的 $R^2$ 为0.74,呈正相关关系(图4(c)),说明喀斯特森林中,非毛管孔隙度对土壤持水性能有一

定影响。毛管孔隙与非毛管孔隙度均属于土壤孔隙的一部分,故土壤的两种孔隙度的增加都会使得土壤的持水量的增加。毛管孔隙是通过毛管作用持有水分,其数量有限,非毛管孔隙度是土壤中的大孔隙,当土壤饱和时能持有较多的水分,所以非毛管孔隙度与饱和的含水量的相关性比毛管持水量的更加显著。饱和的含水量与毛管持水量 $R^2$ 为0.83,呈正相关关系(图4(d))。通过上述分析可知,土壤容重越小,毛管孔隙度越大,且毛管持水量偏大的林型土壤饱和含水量越大。喀斯特森林土壤持水能力很大程度上取决于土壤容重,非毛管孔隙度、毛管持水量的大小也有一定影响,毛管孔隙度对喀斯特森林土壤持水能力的影响并不显著。

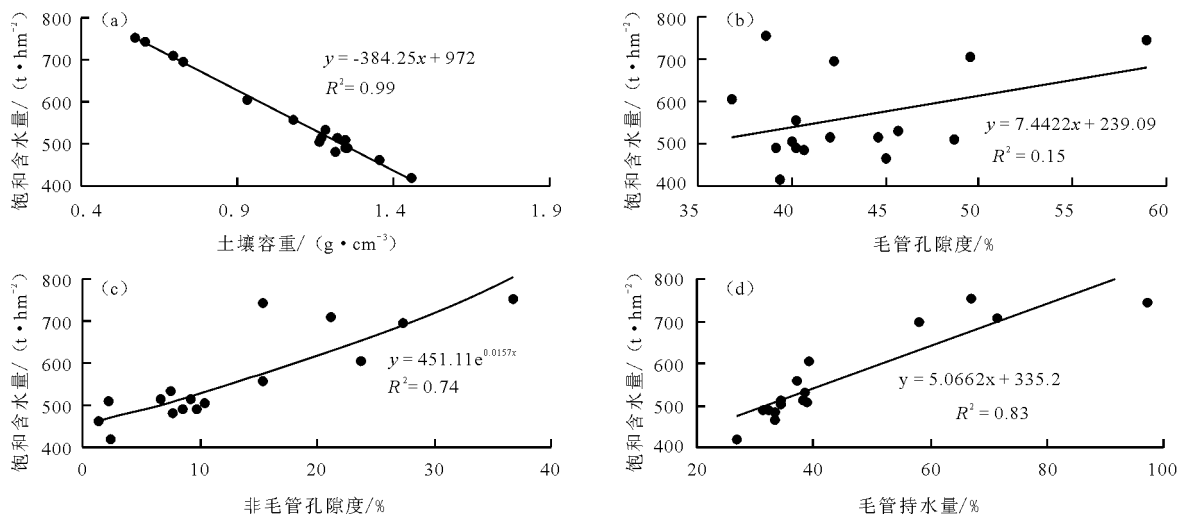


图4 土壤物理性质与饱和含水量的关系

## 5 结论

本文以贵州典型喀斯特林地研究对象,采用野外采样与室内实验分析结合的方法,对黄壤针叶林、石灰土针叶林、阔叶林、混交林4种林型下土壤持水特性进行分析,主要结论如下:

喀斯特林地内土壤容重随着土层深度的增加而增大,而土壤的孔隙度随着土层深度的增加而减小。两者的变化规律正好相反,说明两者之间存在着负相关的关系。两者又共同影响土壤的持水性能,容重越大,孔隙度越小,土壤持水性能越差。同为石灰土情况下,土壤容重的均值大小为针叶林>阔叶林>混交林,有效持水量的大小为阔叶林>混交林>针叶林,说明阔叶林土壤持水能力最强。可能原因是喀斯特阔叶林枯落物较多,有机质和腐殖质层较厚,有利于降水下渗和贮存。生长在不同土壤类型的针叶林,土壤持水能力也有所差异。黄壤针叶林

土壤容重小于石灰土针叶林,两种林型土壤孔隙度差异不明显,除毛管持水量外,其它持水能力指标黄壤针叶林均略大于石灰土针叶林。喀斯特林地土壤饱和的含水量很大程度取决于土壤容重,非毛管孔隙度、毛管持水量的大小也影响着饱和的含水量,毛管孔隙度对饱和的含水量的影响并不显著。

#### 参考文献:

- [1] 张浩,潘介昌,唐光大,等. 广东天井山森林群落植物多样性与土壤持水性研究[J]. 广东林业科技,2002,18(1):25-30.
- [2] 林义辉,张苏峻. 广东省蕉岭长潭省级自然保护区森林土壤持水性的垂直空间格局研究[J]. 华南农业大学学报,2011,32(4):78-81.
- [3] 孔维健,周本智,徐升华,等. 水源涵养林水文生态效应研究[J]. 现代农业科技,2009(6):235-236.
- [4] Wang B, Wu F, Xiao S, et al. Effect of succession gaps on

- the understory water - holding capacity in an over - mature alpine forest at the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(5):692 - 703.
- [5] 赵锦梅,张德罡,刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J]. *自然资源学报*, 2012,27(3):422 - 429.
- [6] 侯瑞萍,张克斌,郝智如. 造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响[J]. *生态环境学报*, 2015,24(4):624 - 630.
- [7] 赵磊,王兵,蔡体久,等. 江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2013,27(1):203 - 208.
- [8] 潘春翔,李裕元,彭亿,等. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J]. *生态学报*, 2012,32(2):538 - 547.
- [9] 吴春雷,殷鸣放,高尚军,等. 辽东地区主要森林类型土壤持水性能研究[J]. *农业科技与装备*, 2010(6):33 - 36.
- [10] 罗金明,王永洁,陈凯,等. 大兴安岭典型针阔混交林区土壤持水效应[J]. *水土保持通报*,2014,34(1):7 - 13.
- [11] 王燕,宫渊波,尹艳杰,等. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J]. *水土保持学报*, 2013,27(5):23 - 27.
- [12] 唐洪辉,张卫强,严峻,等. 南亚热带杉木林改造对土壤及凋落物持水能力的影响[J]. *水土保持研究*, 2014,21(6):47 - 53.
- [13] 陈波,杨新兵,赵心苗,等. 冀北山地6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. *水土保持学报*, 2012,26(2):196 - 202.
- [14] 魏文俊,尤文忠,赵摇刚,等. 退化柞蚕林封育对枯落物和表层土壤持水效能的影响[J]. *生态学报*, 2016,36(3):721 - 728.
- [15] 陈倩,周志立,史琛媛,等. 河北太行山丘陵区不同林分类型枯落物与土壤持水效益[J]. *水土保持学报*, 2015,29(5):206 - 211.
- [16] 胡晓聪,金亮,黄乾亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. *应用生态学报*, 2017,28(1):55 - 63.
- [17] 周秋文,颜红,马龙生,等. 喀斯特地区典型针叶林的降雨截留分配效应[J]. *生态科学*, 2016,35(6):140 - 145.
- [18] 熊康宁,池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. *生态经济*, 2015,31(1):23 - 30.
- [19] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. *Earth - Science Reviews*, 2014, 132(13):1 - 12.
- [20] Cai Hongyan, Yang Xiaohuan, Wang Kelin, et al. Is forest restoration in the Southwest China Karst promoted mainly by climate change or human - induced factors? [J]. *Remote Sensing*, 2014,6(10):9895 - 9910.
- [21] Jiang Yong, Chen Xingbin, Ma Jiangming, et al. Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broadleaved mixed forests in karst topography, Guilin, Southwest China[J]. *Tropical Conservation Science*, 2016,9(4):1 - 9.
- [22] 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.
- [23] 徐树建,任丽英,董玉良,等. 土壤地理学实验实习教程[M]. 济南:山东人民出版社,2015.