

姜霞,吴鹏,郭金鹏,等.雷公山自然保护区森林土壤的持水性能及其海拔响应[J].江苏农业科学,2019,47(4):273-277.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.04.062

雷公山自然保护区森林土壤的持水性能及其海拔响应

姜霞,吴鹏,郭金鹏,崔迎春,谢涛

(贵州省林业科学研究院,贵州贵阳 550005)

摘要:以贵州雷公山国家级自然保护区不同海拔的森林土壤为研究对象,通过对不同海拔和土层森林土壤持水性能的测定分析,研究土壤持水性能的垂直地带性。结果表明,(1)在 0~80 cm 土层,不同海拔森林土壤的容重为 0.489 0~1.242 0 g/cm³,且随着土壤深度的增加而增大,土壤表层容重的变化幅度大于深层土壤;随着海拔的升高,土壤容重呈波状下降趋势。(2)在 0~80 cm 土层,不同海拔森林土壤的总孔隙度为 52%~75%,毛管孔隙度为 44%~65%,非毛管孔隙度为 3.9%~13.1%,土壤总孔隙度、毛管孔隙度整体上随着土壤深度的增加而减小,非毛管孔隙度在不同土层的变化规律不明显;随着海拔的升高,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈波状上升的趋势。(3)在 0~80 cm 土层,不同海拔森林土壤的最大持水量为 42%~154%,土壤毛管持水量为 39%~126%,土壤最小持水量为 35%~114%,土壤贮水能力为 74.7~265.3 t/hm²;土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量整体上随着土壤深度的增加而减小,土壤的贮水能力在不同土层的变化规律不明显;随着海拔升高,土壤的贮水能力、土壤最大持水量、毛管持水量及最小持水量呈波状上升趋势。

关键词:持水性能;土壤物理性质;海拔;雷公山

中图分类号: S718.51+6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)04-0273-05

森林土壤是森林植被生长发育的重要载体,其土壤性质受海拔、母质和植被条件等多种因素的影响^[1],特别是山地土壤的差异体现在随海拔梯度变化引起的温度、湿度、植被类型、土壤类型等要素的显著改变^[2]。土壤水分的物理性质是影响林木生长发育的重要因素,是反映土壤肥力的重要指标,会直接或间接影响土壤的通气透水、蓄水抗旱、保肥性能和养分转化,是土壤生态环境研究的重要内容,也是评价土壤质量的重要指标,对林木的生长有较大影响^[3]。土壤的持水性能主要取决于土壤孔隙的数量和大小组成,它们决定着土壤动态蓄水的有效空间。有关森林土壤持水性能的研究,主要在不同森林类型^[4-5]、不同利用方式之间进行比较^[6-7],而关于土壤的持水性能对海拔的响应的研究较少。

海拔是较为重要的山地地形因子之一,由于海拔不同,气候特征、林分类型和土壤类型发生改变,影响土壤成土因素,导致土壤持水性能在不同海拔范围内具有明显差异^[8-9]。随海拔梯度增加,气候变得湿冷,土壤的水热条件和植被均发生变化,所以山地土壤的分布和形成过程与海拔的变化有密切关系^[10]。雷公山位于贵州省东南部,正处于长江水系与珠江水系极为明显的分水岭高地,森林植物区系丰富,地带性植被属中亚热带东部偏湿性常绿阔叶林,而雷公山山体高大,最高峰海拔为 2 178.8 m,相对高差在 1 500 m 以上,植被有明显的垂直分布规律,随着海拔的升高,植被类型分别为以栲、木

莲为主的常绿阔叶林,以水青冈、长梗木莲为主的山地常绿落叶阔叶混交林,以樱、白辛树为主的落叶阔叶林,以杜鹃、箭竹为主的灌丛^[11],适于开展土壤持水性能垂直地带性研究。目前,对雷公山的研究主要集中在外来植物^[12]、常绿落叶阔叶混交林碳素积累^[13]等方面。为此,本研究分析了雷公山不同海拔的土壤持水性能,探讨其土壤层次分布规律和随海拔梯度的变化规律,有助于合理利用森林,提高土壤的保水通气能力,从而为系统阐明森林土壤的生态功能与特征,并为雷公山生态保护与利用提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

雷公山国家级自然保护区地处贵州省东南部,地跨 108°5′~108°24′E,26°15′~26°32′N,总面积为 47 792 hm²,雷公山是贵州苗岭山脉东段主峰,最高峰海拔为 2 178.8 m,属于中亚热带季风山地湿润气候区,具有冬无严寒、夏无酷暑、雨量充沛的气候特点,年平均气温直降率为 0.46 °C/100 m,年均降水量为 1 300~1 600 mm,森林覆盖率为 88.79%。最冷月(1月)山顶、山麓的平均气温分别为 -0.8、4~6 °C,最热月(7月)山顶、山麓的平均气温分别为 17.6、23.0~25.5 °C,山顶、山麓的年平均温度分别为 9.2、14.7~16.3 °C,年降水量在 1 300~1 600 mm 之间。雷公山森林植物区系丰富,共有 1 390 种,分属于 273 科 679 属,常绿落叶阔叶混交林中落叶树种以水青冈(*Fagus longipetiolata*)、亮叶水青冈(*Fagus lucida*)、多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、白辛树(*Pterostyrax psilophyllus*)等为主,常绿树种以栲(*Castanopsis fargesii*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、木莲(*Manglietia fordiana*)、木荷(*Schima superba*)等为主。林下灌木主要有狭叶方竹(*Chimonobambusa angustifolia*)、柃木(*Eurya japonica*)、

收稿日期:2017-11-14

基金项目:贵州省科学技术基金(编号:黔科合 J 字[2014]2110 号);贵州省林业厅项目(编号:2007-02);贵州省科技厅项目[编号:黔科合院士站(2014)4006]。

作者简介:姜霞(1981—),女,重庆人,硕士,副研究员,主要从事森林生态学方面的研究。E-mail:43644135@qq.com。

圆锥绣球 (*Hydrangea paniculata*) 等。林下草本有楼梯草 (*Elatostema umbellatum*)、矮冷水花 (*Pilea peploides*)、禾本科 (*Poaceae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、菊科 (*Asteraceae*) 及蕨类 (*Pteridophyta*) 植物等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 本研究于 2015 年 10 月在全面踏查的基础上,在不同海拔选择林相相对整齐、立地条件相对一

致的代表性地段设置了 10 块样地,样地面积为 20 m×30 m。为了减少样地间的空间异质性,在每个梯度上选择坡向、坡度及小地形类似的样地。在每个样地的对角线上设置 3 个 5 m×5 m 的灌木小样方,3 个 1 m×1 m 草本和枯落物层小样方,调查样地内乔木树种(胸径≥2 cm)的种类、胸径和树高,以及灌、草种类与盖度等,样地基本情况见表 1。

表 1 样地植被与地理位置等基本情况

样地号	海拔 (m)	植被类型	植被情况	地理位置
1	2 170	高山灌丛	杜鹃、箭竹	26°23.245'N,108°12.184'E
2	2 000	落叶阔叶林	青榨槭、野樱、白檀	26°22.996'N,108°12.107'E
3	1 800	常绿落叶阔叶混交林	野樱、大叶锥、亮叶青冈、漆树、绣球花、十齿花	26°22.912'N,108°11.738'E
4	1 700	常绿落叶阔叶混交林	白辛树、樱树、十齿花、西南红山茶、红花木莲、野核桃	26°42.514'N,109°14.535'E
5	1 550	常绿落叶阔叶混交林	杜鹃、鹅耳枥、山矾、岩桂、贵州鹅耳枥、木兰	26°22.482'N,108°14.881'E
6	1 400	常绿落叶阔叶混交林	亮叶青冈、雷公鹅耳枥、银木荷、野樱	26°27.782'N,108°16.242'E
7	1 200	针阔混交林	杉、雷公鹅耳枥、马尾松	26°22.345'N,108°16.301'E
8	1 000	针阔混交林	杉、枫香、润楠、倒卵叶木莲、五裂槭	26°21.125'N,108°16.864'E
9	850	常绿阔叶林	亮叶青冈、青冈栎、甜槠栲、润楠	26°20.714'N,108°17.419'E
10	700	常绿阔叶林	甜槠栲、银木荷、光叶石楠、丝栗栲	26°19.825'N,108°18.320'E

1.2.2 样品采集及处理 分别在各样地内随机按“品”字形挖掘 3 个土壤剖面,共计 30 个。按土壤发生层次,采用体积为 100 cm³ 的环刀(高 5 cm,直径 5 cm)分别取 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层的原状土样,用环刀法测定土壤容重和孔隙度等物理指标,并计算土壤的最大持水量、毛管持水量、最小持水量、土壤贮水量。

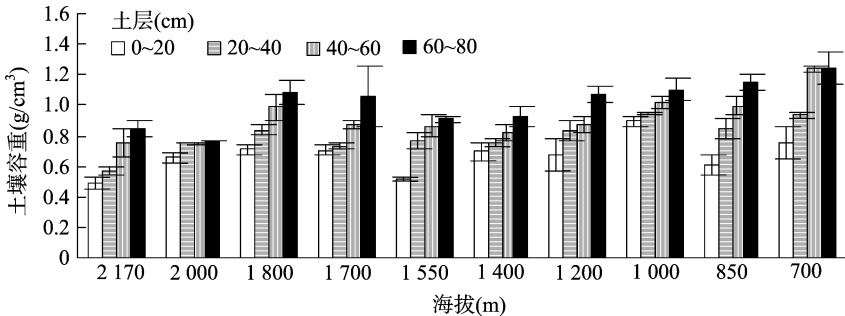
1.2.3 数据处理 用 SPSS 18.0 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),以检验不同海拔土壤物理性质的差异显著性,用 Duncan's 法进行多重比较($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 海拔对土壤容重的影响

土壤容重是土壤最基本的物理性质指标之一,综合反映了土壤的透水性、通气性和根系生长的阻力。由图 1 可知,沿海拔梯度变化,0~80 cm 土层雷公山国家级自然保护区森林

的土壤容重为 0.489 0~1.242 0 g/cm³;在不同海拔梯度上,土壤容重在 0~80 cm 土层随着海拔的增加呈波状下降趋势,0~80 cm 土层最大值出现在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤平均容重为 1.043 8 g/cm³,最小值出现在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,土壤平均容重为 0.663 6 g/cm³。不同海拔的森林土壤容重呈现这种变化趋势,可能由于海拔为 2 170 m 的高山灌丛下枯枝落叶层较厚,人为干扰较少,从而有效改善了土壤容重。由图 1 可知,同一土层的土壤容重在部分海拔间有明显差异,且土壤容重随着土壤深度的增加而增大,表现为 0~20 cm<20~40 cm<40~60 cm<60~80 cm,4 个土层在不同海拔下的土壤容重分别为 0.48~0.89、0.57~0.95、0.74~1.23、0.77~1.24 g/cm³,且 0~20 cm 到 20~40 cm 土层的土壤容重增加幅度最大,为 19.2%,随着土层的加深,土壤容重增加幅度变化不大,60~80 cm 土层的土壤容重较 40~60 cm 土层的增加幅度为 10.7%。



同一土层的不同海拔间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下图同

图1 不同海拔不同土层的森林土壤容重

2.2 海拔对孔隙度状况的影响

2.2.1 海拔对土壤总孔隙度的影响 由图 2 可知,沿海拔梯度变化,0~80 cm 土层雷公山国家级自然保护区森林土壤总孔隙度为 52%~75%,随着海拔的升高呈波状上升的趋势,最大值基本出现在海拔为 2 170 m 的高山灌丛下,土壤平均总孔隙度为 69.7%;较小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,

土壤平均总孔隙度为 56.3%;海拔为 2 170 m 的高山灌丛土壤总孔隙度是海拔为 700 m 的常绿阔叶林的 1.24 倍。

由图 2 还可以看出,在不同海拔梯度上,雷公山自然保护区土壤总孔隙度在同一土层差异明显,不同海拔的土壤总孔隙度整体上随着土壤深度的增加而减小,与土壤容重的变化趋势相反,表现为 0~20 cm>20~40 cm>40~60 cm>60~

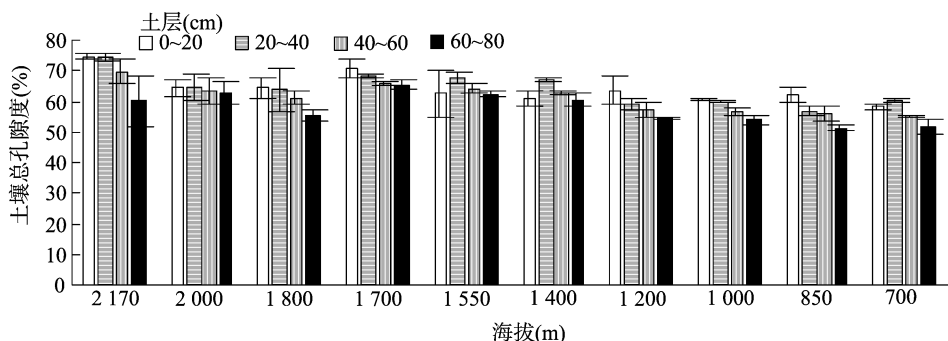


图2 土壤总孔隙度随深度的变化情况

80 cm。4 个土层在不同海拔下的土壤总孔隙度分别为 58%~75%、58%~74%、55%~70%、52%~60%。

2.2.2 海拔对土壤毛管孔隙度的影响 由图 3 可知,随海拔梯度的变化,0~80 cm 土层雷公山国家级自然保护区森林土壤的毛管孔隙度为 44%~65%,随着海拔的升高呈波状上升的趋势。最大值在海拔为 2170 m 的高山灌丛,土壤平均毛管孔隙度为 61.5%;最小值在海拔为 850 m 的常绿阔叶

林,土壤平均毛管孔隙度为 50.2%;海拔为 2170 m 的高山灌丛的土壤毛管孔隙度是海拔为 850 m 的常绿阔叶林的 1.22 倍。由图 3 还可看出,在不同海拔梯度上,雷公山自然保护区土壤毛管孔隙度在同一土层差异明显,除海拔为 2170、2000、1800、1400、700 m 的土壤毛管孔隙度随着土壤深度的增加呈先上升后下降的趋势外,其他海拔下的土壤毛管孔隙度随土壤深度的增加变化趋势不一致。

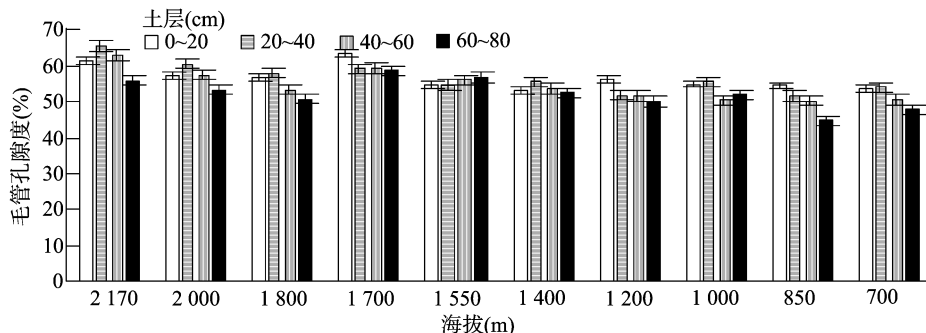


图3 不同海拔森林土壤的毛管孔隙度

2.2.3 海拔对土壤非毛管孔隙度的影响 由图 4 可知,随着海拔梯度的变化,0~80 cm 土层雷公山国家级自然保护区森林土壤非毛管孔隙度为 3.9%~13.1%,随着海拔的升高呈波动上升趋势。0~80 cm 土层最大值在海拔为 2170 m 的高

山灌丛,土壤平均非毛管孔隙度为 8.3%;0~80 cm 土层最小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤平均非毛管孔隙度为 3.9%。从土层变化上看,土壤非毛管孔隙度无明显变化规律。

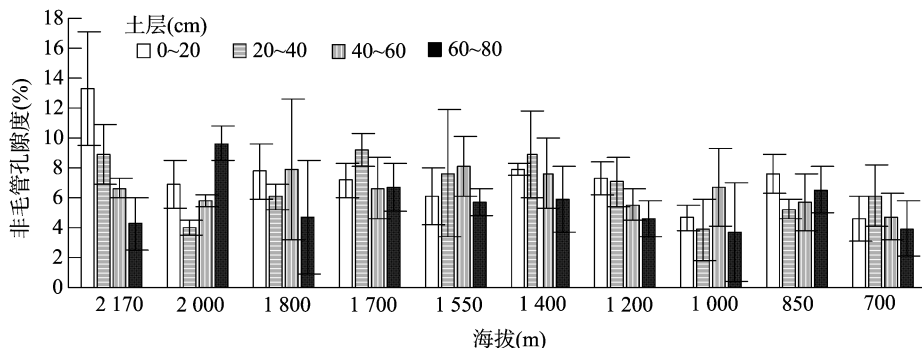


图4 不同海拔森林土壤的非毛管孔隙度

2.3 海拔对土壤持水特征的影响

由图 5 可以看出,随着海拔梯度的变化,0~80 cm 土层雷公山国家级自然保护区的森林土壤最大持水量为 42%~154%,随着海拔的升高呈波状上升的趋势。0~80 cm 土层最大值在海拔为 2170 m 的高山灌丛,土壤的平均最大持水量为 114%;0~80 cm 土层最小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤的平均最大持水量为 58%;海拔为 2170 m 的高山

灌丛土壤的最大持水量是海拔为 850 m 的常绿阔叶林的 1.95 倍。0~80 cm 土壤毛管持水量为 39%~126%,随着海拔的升高呈波动上升的趋势。0~80 cm 土层最大值在海拔为 2170 m 的高山灌丛,土壤平均毛管持水量为 99%;0~80 cm 土层最小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤平均毛管持水量为 53%;海拔为 2170 m 的高山灌丛土壤毛管持水量是海拔为 850 m 的常绿阔叶林的 1.86 倍。0~80 cm 土

壤最小持水量为 35% ~ 114%,随着海拔的升高呈波状上升的趋势。0 ~ 80 cm 土层最大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,土壤平均最小持水量为 92%;0 ~ 80 cm 土层最小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤平均最小持水量为 45%;海拔为 2 170 m 的高山灌丛土壤最小持水量是海拔为 850 m 的常绿阔叶林的 2.02 倍。在 0 ~ 80 cm 土层,雷公山国家级自然保护区森林土壤的贮水能力 (t/hm^2) 为 74.7 ~ 265.3 t/hm^2 ,随着海拔的升高呈波状上升的趋势。0 ~ 80 cm 土层最大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,土壤贮水能力为

165.3 t/hm^2 ;0 ~ 80 cm 土层最小值在海拔为 1 000 m 的针阔混交林,土壤贮水能力为 97.0 t/hm^2 ;海拔为 2 170 m 的高山灌丛的土壤最小持水量是海拔为 850 m 的常绿阔叶林的 1.70 倍。

从土壤剖面看,雷公山自然保护区在不同海拔梯度上的最大持水量、毛管持水量和最小持水量在同一土层差异明显,不同海拔的森林土壤最大持水量、毛管持水量和最小持水量均随着土层深度的增加而降低。在不同海拔梯度上,土壤贮水能力在同一土层差异明显,但土壤贮水能力在不同土层间的变化规律不明显。

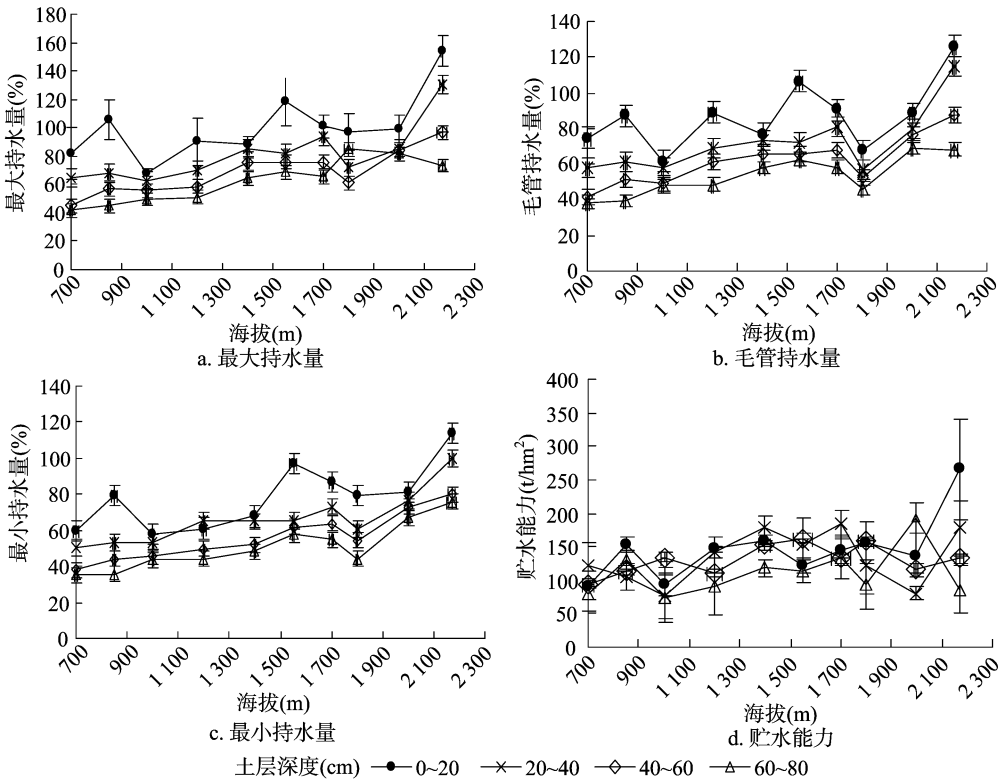


图5 不同海拔土壤持水性能随土壤深度的变化情况

2.4 土壤持水性能与物理性质的相关性

土壤的物理指标包括土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度等,它们均会影响土壤的持水性能。将土壤主要物理指标与持水性能进行简单的相关分析(表 2),可以看出,土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量和贮水能力都与土壤容重呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.887、-0.884、-0.861、

-0.572。贮水能力主要取决于土壤的非毛管孔隙状况,土壤非毛管孔隙度越大,土壤的贮水能力越好,土壤的持水能力越强。

3 结论与讨论

随着海拔梯度的变化,雷公山国家级自然保护区森林土

表 2 土壤的物理性质与持水性能的相关性

类别	相关系数							
	最大持水量	毛管持水量	最小持水量	土壤容重	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	总孔隙度	土壤贮水能力
最大持水量	1.000							
毛管持水量	0.928 **	1.000						
最小持水量	0.962 **	0.953 **	1.000					
土壤容重	-0.887 **	-0.884 **	-0.861 **	1.000				
非毛管孔隙度	0.642 **	0.533 **	0.549 **	-0.572 **	1.000			
毛管孔隙度	0.723 **	0.769 **	0.780 **	-0.590 **	0.125	1.000		
总孔隙度	0.881 **	0.871 **	0.876 **	-0.741 **	0.489 **	0.926 **	1.000	
土壤贮水能力	0.642 **	0.533 **	0.549 **	-0.572 **	1.000 **	0.178	0.466 **	1.000

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

壤的持水性能的变化差异明显。由于受到多种因素的影响,不同海拔梯度下的土壤容重、孔隙度、持水量等都表现出比较复杂的变化。土壤容重不仅是土壤物理性质最重要的指标之一,也是土壤紧实度的敏感性指标。土壤容重愈小,表明土壤疏松,孔隙多,土壤的透水性和通气性较好;反之,土壤容重愈大,则表明土壤板结,空隙少^[14-15]。雷公山国家级自然保护区不同海拔下的森林土壤容重为 0.489 0 ~ 1.242 0 g/cm³,随着土壤深度的增加而增大,表层土壤容重的变化幅度大于深层土壤,这与前人的研究结果^[4]相似。推测其原因,可能是受土壤表层凋落物的影响,有机质也主要集中在表层。随着海拔的升高,雷公山森林土壤容重呈波状下降趋势。最大值出现在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,土壤平均容重为 1.043 8 g/cm³;最小值出现在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,土壤平均容重为 0.663 6 g/cm³。说明随着海拔的增加,土壤通气透水性有所改善,这主要由于随着海拔升高,温度逐渐降低,构成植被的植物种类阔叶类成分减少,针叶类成分增多,使得凋落物的持水性降低。

林地涵养水源、调节地表径流的作用主要取决于土壤的孔隙结构、质地,也取决于孔隙度的大小和性质^[16]。土壤孔隙度大小、数量及分配是土壤物理性质的基础,与持水性都是表征土壤肥力的重要指标,对林木根系伸展、物质转化、土壤排水、通气等都会产生直接影响^[17]。雷公山国家级自然保护区不同海拔下的森林土壤总孔隙度为 52% ~ 75%,毛管孔隙度为 44% ~ 65%,非毛管孔隙度为 3.9% ~ 13.1%,土壤总孔隙度、毛管孔隙度整体上随着土壤深度增加而减小,但非毛管孔隙度无明显的变化规律;随着海拔升高,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈波状上升趋势。总孔隙度较大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,平均为 69.7%;较小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林,平均为 56.3%。毛管孔隙度较大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛,平均为 61.5%;较小值在海拔为 850 m 的常绿阔叶林,平均为 50.2%。较大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛的土壤平均非毛管孔隙度为 8.3%;较小值在海拔为 700 m 的常绿阔叶林的土壤平均非毛管孔隙度为 3.9%。在不同海拔下,雷公山国家级自然保护区森林土壤孔隙度与容重呈极显著负相关关系,相关系数为 -0.741 ~ -0.572,即容重越大,土壤的毛管孔隙度越小,土壤越紧实,透气性越差,土壤水分、养分运输速率越低,土壤微生物活动较少。

土壤孔隙度越大,意味着土壤潜在涵养水源的能力越强,非毛管孔隙对土壤的水分涵养能力贡献较大^[18]。雷公山国家级自然保护区不同海拔森林土壤最大持水量为 42% ~ 154%,土壤毛管持水量为 39% ~ 126%,土壤最小持水量为 35% ~ 114%,土壤贮水能力为 74.7 ~ 265.3 t/hm²;土壤最大持水量、毛管持水量及最小持水量整体上随着土壤深度增加而减小,土壤贮水能力在不同土层的变化规律不明显。随着海拔的升高,土壤贮水能力、土壤最大持水量、毛管持水量及最小持水量呈波动上升趋势,较大值在海拔为 2 170 m 的高山灌丛。这与田月亮等对浙江省凤阳山在海拔为 300 ~ 1 355 m 范围内土壤持水性能的研究结果^[19]一致,都是随着

海拔升高,土壤容重平均值逐渐减小,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、最小持水量、土壤贮水量平均值均增大。此外研究表明,高海拔地区土壤中树根、半风化岩石和动物活动等造成的非毛管孔隙较多,蓄水能力较强。

参考文献:

- [1] 李俊清. 森林生态学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2010.
- [2] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1024 - 1041.
- [3] 邱莉萍, 张兴昌. 子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 965 - 972.
- [4] 王忠诚, 邓秀秀, 崔卓卿, 等. 洞庭湖区主要森林类型土壤持水性研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(5): 79 - 84.
- [5] 张雷燕, 刘常富, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 95 - 98.
- [6] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 125 - 130, 137.
- [7] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 416 - 424.
- [8] 王飞, 杨永红, 齐瑞, 等. 白龙江上游不同海拔梯度灌丛土壤渗透性能分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(6): 96 - 100, 124.
- [9] 黄琳琦, 向业风, 魏孝荣, 等. 六盘山林区土壤物理性质分布特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 60 - 65.
- [10] Biederbeck V O, Campbell C A, Ukrainetz H, et al. Soil microbial and biochemical properties after ten years of fertilization with urea and anhydrous ammonia[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(1): 7 - 14.
- [11] 周政贤, 姚茂森. 雷公山自然保护区科学考察集[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1989.
- [12] 杨春玉, 李芳念, 余德会, 等. 贵州雷公山国家级自然保护区外来入侵植物初步研究[J]. *中国林副特产*, 2017(3): 79 - 84.
- [13] 丁访军, 潘忠松, 吴鹏, 等. 贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1761 - 1768.
- [14] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 151 - 153, 173.
- [15] 邢菊香, 郭建英, 赵杏花, 等. 黄土丘陵区退耕还林后土壤物理性质恢复特征的研究——以陕西省吴起县为例[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(1): 41 - 46.
- [16] 骆士寿, 李意德, 陈德祥, 等. 广东白盆珠水库水源林土壤水源涵养能力研究[J]. *生态科学*, 2007, 26(2): 159 - 164.
- [17] 游月娥. 采伐方式对马尾松林下植被和土壤肥力的影响[J]. *防护林科技*, 2005(6): 9 - 11.
- [18] 吴庆贵, 邹利娟, 吴福忠, 等. 涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 254 - 258.
- [19] 田月亮, 张金池, 李海东, 等. 不同林分类型土壤水分物理性质及其海拔效应——以浙江省凤阳山为例[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1): 53 - 57, 61.