哈尼梯田景观水源林区土壤水分垂直变化与持水性能

宗路平，角媛梅，华红莲，向东福，何礼平，胡志昕，王大琼

（云南师范大学 旅游与地理科学学院，云南 昆明 650500）

摘　要：采用 ThetaProbeML2x 土壤水分测定仪和环刀取样法对哈尼梯田景观水源林区主要植被类型（林地和草地）下 0—300 cm 土层的土壤水分特征及其持水性能进行了研究。研究结果表明：（1）各样地〔样地Ⅰ（林地），样地Ⅱ（林地），样地Ⅲ（草地）〕土壤水分垂直分布为“双峰”波动型，样地Ⅰ和Ⅲ波动弱，样地Ⅱ波动剧烈，拐点出现在 60，140 和 230 cm 土层附近，土壤水分运动趋势在拐点处受邻层土壤含水量影响大；（2）粉沙性质地土壤（样地Ⅱ）水分变异系数高于黏性质地土壤（样地Ⅰ，Ⅲ）；林地土壤水分变异系数大于草地土壤；（3）样地Ⅰ土壤和草地Ⅲ土壤蓄水量均较样地Ⅱ高，且其值相近，黏性壤土的蓄水能力优于粉沙性土壤；（4）水源林区 0—160 cm 土层最大持水量和毛管持水量由大到小均表现为：样地Ⅰ＞样地Ⅲ＞样地Ⅱ；非毛管持水量由大到小表现为：样地Ⅱ＞样地Ⅰ＞样地Ⅲ，样地Ⅰ和样地Ⅲ的土壤水源涵蓄能力较强，样地Ⅱ土壤调节水分能力较强。

关键词：水源林区；土壤水分；垂直变异；土壤持水性能；哈尼梯田景观

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)04-0059-06　　**中图分类号**：S715.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.025

Vertical Changes of Soil Moisture and Water Holding Capacity of Hani Terraces Landscape in Water Conservation Forest Region

ZONG Lu-ping, JIAO Yuan-mei, HUA Hong-lan, XIANG Dong-fu,
HE Li-ping, HU Zhi-xin, WANG Da-qiong

(*School of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan* 650500, *China*)

Abstract: Using soil moisture monitor (ThetaProbeML2x) and soil ring sampler methods, we analyzed the soil moisture and water capacity of the main landscape(forest, grassland)soil with a 300 cm depth in the water conservation forest region in the Hani terraces landscape in Yuanyang County, Yunnan Province. The results indicated that: (1) The distribution features of the three soil profile sample plot Ⅰ(forest), sample plot Ⅱ (forest), sample plot Ⅲ (grass) were “double-peak fluctuation” type with turning points at nearby the 60, 140 and 230 cm. (2) The coefficient of variation of sandy soil moisture was higher than clay soil (sample plot Ⅰ, Ⅲ), and the coefficient of variation of forest was higher than grass while both soil samples were clay. (3) The water storage capacity of both sample plot Ⅰ (forest) and on of sample plot Ⅲ (grass) were higher than sample plot Ⅱ (forest), and values were similar, the water storage ability of clay loam was better than that of silty sand soil. (4) Both the max water holding capacity and capillary moisture capacity at the 0—160 cm depth were ordered as: sample plot Ⅰ(forest) higher than sample plot Ⅲ (grass) and higher than sample plot Ⅱ(forest), this indicated the water retention function of sample plot Ⅰ(forest) and sample plot Ⅲ (grass) were higher, however, soil water regulation function of sample plot Ⅱ(forest) was higher.

Keywords: **water conservation forest region; soil moisture; vertical variation; soil water holding capacity; Hani terraces landscape**

森林、水系、梯田和村寨是 2013 年被列入世界遗产名录的红河哈尼梯田文化景观的组成要素，其中水是景观中最活跃的因素。因为该区无大中型水库且干季基本无降雨，故地处梯田和村寨之上的水源林区所涵养的水是梯田在旱季主要的水源，是维护景观稳定性的关键要素。因此，探讨哈尼梯田景观水源林区的水源涵养功能可为遗产的持续发展和生态建设提供科学参考。水源林区的水源涵养能力是植被和土

收稿日期：2014-03-11　　修回日期：2014-03-25

资助项目：国家自然科学基金项目“哈尼梯田景观结构—水文连接度与世界遗产保护研究”(41271203)；国际合作项目(ARCO2912-03CMY-Herath)；云南师范大学研究生科研创新基金项目(201436)

作者简介：宗路平(1988—)，男(汉族)，云南省马龙县人，硕士研究生，研究方向为生态水文过程。E-mail:lupingzong08@163.com。

通信作者：角媛梅(1972—)，女(汉族)，云南省马龙县人，博士，教授，主要从事景观生态研究。E-mail:ymjiao@sina.com。

壤共同作用的结果，与植被类型和盖度、枯落物组成和现存量、土层厚度及土壤物理性质等密切相关，且土壤是水源涵养的主要载体，土壤水分及其持水性能是土壤水源涵养能力的集中体现[1-2]。有关土壤水分的研究主要集中在土壤水分的垂直变化[3]、季节动态变化[4]，土壤水分的有效性评价以及土壤持水能力和水源涵养功能等方面[5-6]。同时，有关植被、地形以及土壤质地等因子与土壤水分及其水源涵养能力的相关研究也已开展[7-11]。

综上所述，水源林区土壤水源涵养能力主要受植被类型和土壤质地的影响。因此，本研究以地处红河哈尼梯田核心区内的元阳县全福庄梯田片区上游的水源林区为对象，以该区两种优势植被类型（原始森林和草地）下的土壤为研究对象，分析其水分特征和持水性能，并探讨植被类型和土壤质地的影响，以期为该区水源涵养功能的进一步研究提供依据，为哈尼梯田景观有效应对极端干旱气候提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省红河州元阳县全福庄河流域（全福庄梯田片区）上游，距元阳县城南沙 28 km。地理坐标为 23°05′20″—23°07′20″N，103°43′20″—103°47′30″E，海拔在 1 685～2 095 m 之间，面积约 4.6 km²。地处哀牢山山脉的南端，属红河一级支流麻栗寨河的源头区，山脊走向为北东—南西向，整个地势南高北低，自南向北倾斜。该区域属亚热带山地季风气候，全年日照时数 1 770.2 h，年无霜日 363 d，年均温 14.19 ℃，雨量充沛，年降水量 1 353.8 mm，年蒸发量 929.4 mm，年均湿度 90.3%。土壤多为黄壤、黄棕壤，土壤剖面发育完整。

1.2 样地布设与土样采集

在角媛梅等[12]对研究区内景观格局特征分析及流域水文资源调查研究的基础上，于 2013 年 10 月通过实地踏勘，在研究区选择原始森林地和荒草地布设具有典型代表性的标准实验样地 3 块〔样地Ⅰ（林地），样地Ⅱ（林地），样地Ⅲ（草地）〕，样地规格为 20 m×20 m。样地情况详见表 1。

在每个样地内代表性地段挖掘 3 个土壤剖面（深 300 cm），对应的土壤剖面为样地 $Ⅰ_1$，$Ⅰ_2$ 和 $Ⅰ_3$，样地 $Ⅱ_1$，$Ⅱ_2$ 和 $Ⅱ_3$，样地 $Ⅲ_1$，$Ⅲ_2$ 和 $Ⅲ_3$。采用 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪对各样地土壤水分进行测定，测定深度为 300 cm，每 10 cm 为一个测层，每层重复 3 次，取平均值为该层的土壤含水量（%）。用铝盒取土样用烘干法进行标定，精确到 0.01%。按 0—20 cm，20—40 cm，40—60 cm，60—80 cm，80—100 cm，100—120 cm，120—140 cm，140—160 cm 共 8 个层次用环刀取原状土样，每层取 3 个重复样，用于测定毛管含水量、饱和含水量等。计算取每个样地内 3 个土壤剖面水分数据均值为该样地土壤含水量。

表 1 水源区 3 个样地的基本情况

	样地Ⅰ（林地）	样地Ⅱ（林地）	样地Ⅲ（草地）
立地因子	坡度 15°～25°，坡向 NE35°，海拔 2 004 m，地理坐标：23°5′42″N，102°45′47″E。黏性黄壤	坡度 10°～15°，坡向 NW60°，海拔 1 986 m，地理坐标：23°5′36″N，102°45′54″E。粉沙性土壤	坡度 5°～10°，坡向 NE15°，海拔 2 060 m，地理坐标：23°5′33″N，102°46′6″E。黏性黄壤
群落结构	常绿阔叶林。乔木层中，元江拷占 40%，混有滇润楠、五眼果、尖子木等，树高 15～20 m，平均胸径 20～25 cm，郁闭度 70%～80%；灌木层以毛野牡丹为优势种，覆盖度 70%～80%，株高 0.5～2 m，胸径 0.5～4 cm；草本层为牡蒿、鳞毛蕨，覆盖度 60%，均高 0.1～0.3 m。枯落物厚 5～10 cm，有腐殖质层	常绿阔叶林。乔木层主要为栎类，有 10 棵左右千年古树，树高约 25 m，胸径在 100～120 cm，郁闭度 70%～80%。灌木层为五眼果、尖子木的幼苗，覆盖度 60%～70%，均高 10 m，胸径 10～15 cm。草本层为牡蒿、鳞毛蕨、苔草等，覆盖度 30%，均高 0.2～0.5 m。枯落物厚 3～5 cm，有腐殖质层	荒草地。建群种主要为蕨类，生长十分茂密，高度 1.2～1.5 m 左右，伴生种有紫茎泽兰、沿阶草等，有零星分布的小灌木，如荚蒾、浆果栎等。草地总盖度 95%，枯落物厚度 1～2.5 cm，有腐殖质层

1.3 分析方法与数据处理

采用 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪测定的各样地 0—300 cm 土层蓄水量计算公为：

$$W=\sum W_i,\quad W_i=Q_i\cdot D_i$$

式中：W_i——各样地 0—300 cm 土层中各土层蓄水量（mm）；Q_i——ThetaProbeML2x 测量的各土层的体积含水量（%）；D_i——土层厚度（mm），W——0—300 cm 土层的总蓄水量（mm）。

采用中国生态系统研究网络陆地生态系统水环境观测规范[13-14]中的方法测定土壤含水量、土壤容重及土壤孔隙度。土壤持水量的计算公式为：

$$V=10\ 000P\cdot D$$

式中：V——土壤最大/毛管/非毛管持水量（t/hm²）；D——土层厚度（m）；P——土壤孔隙度（%）。

2　结果与分析

2.1　水源涵养林区土壤水分垂直变化特征

将 3 个样地的土壤剖面水分数据进行统计。由图 1 可以看出:(1) 样地Ⅰ土壤在 0—300 cm 水分含量呈现上升—下降—上升—下降,最后趋于平稳的波动变化。0—70 cm 土层,水分含量从最低值 16.75%(10 cm)上升至 42.33%,变化剧烈;70—150 cm 土层,水分含量在 40%附近波动,变化微弱;150—300 cm 土层,水分含量先微升再逐渐降低,最后趋于平稳。共出现两个拐点 42.33 %(70 cm);38.73%(150 cm),最大值为 45.50%(180 cm)。(2) 样地Ⅱ土壤在 0—300 cm 土层水分含量变化较复杂,但仍呈现上升—下降—上升—下降,最后趋于平稳的波动趋势。水分含量在 0—50 cm 土层中逐渐上升,之后逐渐降低,在 100 cm 处出现第 1 个拐点,即最低点 9.47%,之后呈大幅上升,在 170 cm 处出现第 2 个拐点 33.83%,然后再次下降至第 3 个拐点 14.43%(220 cm),之后小幅上升达 21.40%(230 cm),最后基本保持在 18%左右,趋于平稳。(3) 样地Ⅲ土壤在 0—300 cm 土层水分含量呈现上升—下降—上升—下降,最后趋于平稳的波动趋势。0—30 cm,土壤水分含量在随土层增加逐渐增加,变幅小于 2%,出现拐点 42.80%(30 cm);30—140 cm,土壤水分含量呈现逐渐降低,出现第 2 个拐点 35.07%(140 cm);140—260 cm,土壤水分含量呈现小幅度的增加,出现第 3 个拐点 45.30%(260 cm);260—300 cm 土壤水分含量逐渐降低,最后趋于平稳。(4) 根据土壤水分垂直变化类型划分标准,3 个样地土壤在 0—300 cm 水分垂直变化都为“双峰”波动型,但样地Ⅰ土壤、样地Ⅲ土壤波动较弱,为“双峰”弱波动型;而样地Ⅱ土壤波动剧烈,为“双峰”剧烈波动型。

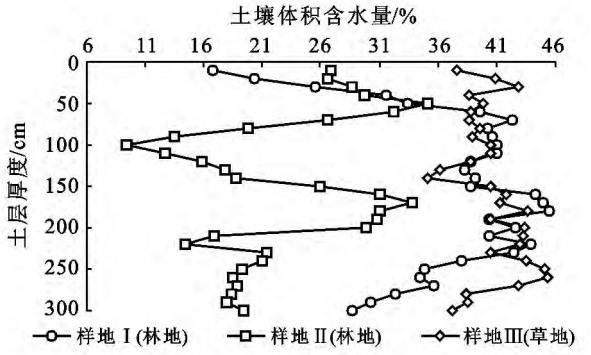


图 1　水源区 3 样地土壤水分的垂直分布

2.2　原始森林和荒草植被类型下黏性土壤水分垂直分布特征

样地Ⅰ土壤和样地Ⅲ土壤都是黏性黄壤,但地表植被类型不同,将两剖面各发生层土壤水分数据进行统计。表 2 结果显示:(1) 在 0—300 cm 的整个剖面上,土壤水分平均含量表现为:Ⅲ>Ⅰ,且均值间差异显著($p<0.05$),变异系数表现为:Ⅰ>Ⅲ,即Ⅰ呈中度变异,Ⅲ为弱变异。因为草地植被群落结构单一,枯落物层、腐殖层薄,地表径流容易下渗,且土层中无木本植物大根系穿插,干扰因子少,使得土层含水量高,变异小。而林地地被层群落结构复杂,地表枯落物、植物根系的影响较大,导致其土壤水分变异较大;(2) 两剖面各发生层的土壤水分存在明显差异。在 0—60 cm 土层内的土壤水分变异与整个剖面相同,即土壤水分平均含量表现为:Ⅲ>Ⅰ,且Ⅰ呈中度变异,Ⅲ为弱变异。在 60—230 cm 土层内,基本无植物根系分布,土壤水分受黏性黄壤影响,两样地土壤水分含量基本相等,变异极弱。在 230—300 cm 的母岩风化层,由于样地Ⅰ为片麻岩风化物,颗粒较大,多空隙,水分下渗快,土壤水分含量低,变异不大,而Ⅲ为黏性黄壤,故土壤水分含量较上一阶段基本无变化。

表 2　不同植被类型下土壤水分的描述统计

样地	土层/cm	植被类型	最小/%	最大/%	平均值±标准差/%	变异系数/%
Ⅰ	0—300	原始森林	16.75	45.50	36.88 ±7.04	19.08
Ⅲ		荒　草	35.07	45.30	40.51 ±2.56	6.32
Ⅰ	0—60	原始森林	16.75	39.63	27.87 ±8.59	51.30
Ⅲ		荒　草	27.19	39.23	33.82 ±4.32	15.87
Ⅰ	60—230	原始森林	38.23	45.50	41.45 ±2.25	5.42
Ⅲ		荒　草	35.07	43.67	40.36 ±2.40	5.95
Ⅰ	230—300	原始森林	28.73	38.00	33.49 ±3.21	9.60
Ⅲ		荒　草	37.17	45.30	41.52 ±3.41	8.22

2.3　森林植被下粉沙性和黏性壤土土壤水分垂直分布特征

根据样地Ⅱ土壤的剖面发育及土壤质地组成状况,对样地Ⅰ土壤和Ⅱ土壤剖面水分数据进行统计分析(表 3)。在 0—300 cm 整个剖面土层内,平均水分含量表现为:Ⅰ(36.88%)>Ⅱ(22.75%),且均值间

差异显著($p<0.05$)。样地Ⅱ水分含量变异系数较大,变异较强。

两剖面各发生层的土壤水分存在明显差异。在0—50 cm土层,样地Ⅰ和Ⅱ含水量均值分别为25.51%和29.39%,样地Ⅰ土壤的变异系数较大,主要是由于地表植被群落结构复杂度及覆盖度等差异干扰对浅层土壤水分含量造成扰动,导致土壤水分变异较大。50—140 cm土层,样Ⅰ和Ⅱ的含水量均值分别为40.11%和18.53%,均值间差异显著($p<0.05$),而且样地Ⅱ的变异高达38.38%。主要原因主要包括:(1)样地Ⅰ质地为黏性壤土,结构紧实,粒级小,土壤持水性较好;而样地Ⅱ质地是片麻岩强风化物,粉沙性质地,土壤水分下渗快,不易蓄水。(2)样地Ⅱ地表有大量50 a以上树龄的栎类树,更有约10棵千年古栎树,其树根分布广而深,大量树根分布在这层,因植物蒸腾作用树根吸水,导致土壤含水量很低而且变异较大。140—170 cm土层,样地Ⅱ质地为黏性黄壤、结构紧实,而且因上层粉沙性风化物的持水性差,较多水分下渗而汇集在这一土层,使其形成了含水量较高的"蓄水层"。但由于受植物深根吸水影响,故土壤水分变异较大但含量不高。170—230 cm土层,样地Ⅰ仍具有较高的含水量,样地Ⅱ则因质地变为黏壤和片麻岩风化物的胶结物,沙质成分逐渐增多,导致水分含量快速下降,加之受上一层"蓄水"效应的影响,使得这一土层形成了一个相对"干燥层",变异较大;230—300 cm土层,无植物根系影响,土壤水分含量受母岩风化物质地控制,所以维持在一个相对稳定状态。

表3 水源区林地不同土壤质地类型下土壤水分

样地	土层/cm	土壤质地	最小/%	最大/%	平均值±标准差/%	变异系数/%
Ⅰ	0—300	—	16.75	45.50	36.88±7.04	19.08
Ⅱ		—	9.47	35.07	22.75±7.01	30.81
Ⅰ	0—50	黄壤	16.75	33.43	25.51±7.13	27.94
Ⅱ		黄壤	26.63	35.07	29.39±3.43	11.67
Ⅰ	50—140	黄壤	38.23	42.33	40.11±1.28	3.20
Ⅱ		风化物	9.47	32.23	18.53±7.11	38.38
Ⅰ	140—170	黄壤	38.73	45.00	42.67±3.43	8.03
Ⅱ		黄壤	25.93	33.83	30.29±4.01	13.25
Ⅰ	170—230	黄壤	40.40	45.50	42.54±1.99	4.68
Ⅱ		胶结物	14.43	31.03	24.07±7.45	30.95
Ⅰ	230—300	风化物	28.73	38.00	33.49±3.21	9.60
Ⅱ		风化物	18.00	20.97	19.06±0.98	5.15

2.4 水源涵养林区3个样地的土壤蓄水量

对3个样地土壤蓄水量数据统计分析可知(表4),0—300 cm土层内样样地Ⅲ土壤的平均含水量最高,为40.51%,蓄水量为1 215.43 mm,样地Ⅱ土壤最低,为22.75%,蓄水量为682.37 mm,样地Ⅰ土壤水分状况与样样地Ⅲ土壤较相似,平均含水量为36.88%,蓄水量为1 106.30 mm。对3个样地土壤水分数据进行方差分析及多重比较得出,样地Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ在0—300 cm土层内蓄水量差异显著($p<0.05$)。进一步对比样地Ⅰ和Ⅲ的水分状况可知,虽然Ⅰ和Ⅲ的植被类型不同,但在0—300 cm土层样地Ⅲ土壤与样地Ⅰ土壤都具有较高蓄水量,蓄水能力较好。因此,在受西南极端干旱连续影响,水资源供给矛盾日渐突显的哈尼梯田遗产区,在注重对水源林区森林生态系统的保护以及实施"退耕还林"措施的同时,也应注重对草地生态系统的保护和恢复。草地生态系统同样具有较强涵养水源、防止"土壤干化"的生态功能。对比分析Ⅰ和Ⅱ的水分状况,虽然植被同为原始森林,但受土壤质地差异较大影响,土层蓄水量差异明显。综上所述,在哈尼梯田水源林区,植被类型和土壤质地影响土壤剖面水分分布状况,土壤蓄水量受土壤质地影响较大。

2.5 水源涵养林区土壤持水性能分析

土壤是涵养水源的最重要场所,其持水能力是反映水源涵养功能的重要指标。对土壤持水性能指标计算结果(表5)可知,3个样地土壤0—160 cm最大总持水量表现为:Ⅰ>Ⅲ>Ⅱ,表明土壤涵蓄潜力Ⅰ最好,Ⅲ次之,Ⅱ相对较差。毛管总持水量表现为:Ⅰ>Ⅲ>Ⅱ,非毛管总持水量呈现出:Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,表明Ⅰ和Ⅲ的土壤保水性能较好,而Ⅱ的下渗能力较好,调蓄能力较强。从样地类型看,相同土层内,最大持水量除40—60 cm,140—160 cm两层差异不显著,其它层次内样地间差异均显著($p>0.05$);而毛管持水量在0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm土层样地间无显著性差异($p>0.05$),其它土层均达到显著差异水平($p<0.01$);非毛管持水量在20—40 cm,40—60 cm

土层样地间无显著性差异($p>0.05$),其它土层均达到显著差异水平($p<0.05$)。从土壤剖面层次看,样地Ⅰ土壤最大量持水由表层到底层逐渐减小;毛管持水量则是随土层厚度增加呈递增趋势;非毛管持水量由表层到底层逐渐减小。样地Ⅱ土壤最大持水量由表层到底层逐渐减小,最后一层略有增加;毛管持水量则是随土层增加先减小再增加;非毛管持水量由表层到底层呈减少—增加—减小—增加波动变化。草地Ⅲ土壤最大持水量由表层到底层先减小后增加;毛管持水量则是随土层增加呈递增趋势;非毛管持水量由表层到底层先逐渐减小,最逐渐增加。

综上所述,表层土壤由于受地被层及植物根系影响,土壤毛管和非毛管空隙状况均可能存在较大差异,故土壤毛管和非毛管持水量存在较大差异;深层土壤虽然受植被根系的影响逐渐减小,但受到土壤质地因子的控制,因土壤质地差异而导致同土层毛管/非毛管孔隙度差异显著,故土壤毛管和非毛管持水量也差异显著。

表 4　水源区 3 个样地土壤蓄水量

样地	土壤蓄水量/mm							
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm	120—140 cm	140—160 cm
Ⅰ	37.06	57.07	73.06	82.6	81.54	79.87	77.40	83.00
Ⅱ	53.46	58.40	67.3	46.46	22.97	28.53	36.53	57.03
Ⅲ	78.53	81.47	78.63	78.30	79.37	79.3	71.24	82.34
样地	土壤蓄水量/mm							
	160—180 cm	180—200 cm	220—240 cm	240—260 cm	260—280 cm	280—300 cm	0—160 cm	0—300 cm
Ⅰ	90.50	82.93	80.50	69.30	68.10	59.03	571.60	1 106.29
Ⅱ	64.86	60.60	42.37	37.80	37.24	37.43	370.68	682.34
Ⅲ	84.97	83.87	83.97	90.33	81.13	75.74	629.18	1 215.46

表 5　水源区土壤基本物理性质及持水性能

样地	土层/cm	容重(±标准差)/(g·cm^{-3})	孔隙度(±标准差)/%			持水量/(t·hm^{-2})		
			总空隙	毛管	非毛管	最大	毛管	非毛管
Ⅰ		—	—	—	—	9 997.50	7 031.69	2 965.82
Ⅱ	0—160	—	—	—	—	9 238.34	5 934.46	3 303.88
Ⅲ		—	—	—	—	9 247.68	6 707.11	2 540.50
Ⅰ		0.71±0.03	73.17±1.20	41.95±2.20*	31.22±2.12	1 463.47	839.07	624.40
Ⅱ	0—20	0.75±0.02	71.86±0.89	46.03±1.83*	25.83±2.30	1 437.26	920.62	516.64
Ⅲ		0.82±0.02	68.87±0.85	41.92±1.34*	26.95±0.50	1 377.41	838.34	539.07
Ⅰ		0.83±0.04	68.78±1.60	44.06±1.53*	24.72±2.85*	1 375.65	881.28*	494.37*
Ⅱ	20—40	0.80±0.03	69.89±1.08	43.04±1.98*	26.85±3.02*	1 397.86	860.89*	536.97*
Ⅲ		0.94±0.01	64.48±0.49	43.00±0.54*	21.48±0.54*	1 289.66	860.08*	429.58*
Ⅰ		0.92±0.06*	66.31±2.03*	42.05±0.49*	24.26±2.36*	1 326.21*	840.98*	485.23*
Ⅱ	40—60	0.96±0.09*	63.69±3.22*	43.20±1.42*	20.50±4.48*	1 273.86*	863.95*	409.91*
Ⅲ		1.07±0.07*	59.70±2.60*	43.41±0.50*	16.29±3.07*	1 193.94*	868.22*	325.72*
Ⅰ		0.92±0.06	65.34±2.14	44.01±0.35	21.32±2.49	1 306.74	880.26	426.48
Ⅱ	60—80	1.19±0.06	55.22±2.27	40.81±0.73	14.41±2.85	1 104.35	816.21	288.14
Ⅲ		1.34±0.06	49.41±2.39	43.10±0.55	6.31±2.26	988.23	862.09	126.14
Ⅰ		1.06±0.01	59.82±0.50	43.51±0.63	16.31±0.91	1 196.34	870.20	326.14
Ⅱ	80—100	1.31±0.02	50.67±0.61	32.43±1.11	18.24±0.98	1 013.38	648.59	364.79
Ⅲ		1.19±0.03	54.97±1.30	43.71±0.02	11.26±1.28	1 099.37	874.12	225.25
Ⅰ		1.15±0.005	56.63±0.17	46.65±1.29	9.99±1.32	1 132.64	932.92	199.72
Ⅱ	100—120	1.35±0.03	49.00±1.20	23.55±3.21	25.45±3.59	980.03	471.03	509.00
Ⅲ		1.17±0.05	55.83±1.92	41.79±1.10	14.04±3.02	1 116.60	835.74	280.87
Ⅰ		1.22±0.05	54.07±2.07	44.47±3.18	9.59±3.25*	1 081.32	889.49	191.83*
Ⅱ	120—140	1.42±0.07	46.41±2.73	30.30±1.46	16.11±1.63*	928.20	606.06	322.14*
Ⅲ		1.21±0.01	54.22±0.27	39.93±0.28	14.29±0.11*	1 084.33	798.53	285.80*
Ⅰ		1.17±0.04*	55.76±1.65*	44.87±1.46	10.88±1.84	1 115.13*	897.49	217.65
Ⅱ	140—160	1.19±0.02*	55.17±0.58*	37.36±0.19	17.81±0.74	1 103.40*	747.11	356.29
Ⅲ		1.19±0.02*	54.91±0.79*	38.50±0.44	16.41±0.78	1 098.14*	769.99	328.15

注:* 表示相同土层 3 个样地数据差异不显著($p>0.05$)。

3 结 论

(1) 对哈尼梯田水源涵养林区典型植被下 0—300 cm 土层土壤水分垂直变化研究，结果显示，3 个样地土壤水分垂直变异均呈现上升—下降—上升—下降，最后趋于平稳的波动趋势，其拐点约在土层 60，140 和 230 cm 附近。土壤水分运动的趋势在拐点处受邻层土壤含水量影响很大。林地Ⅱ土壤的水分垂直变化属于“双峰”剧烈波动型，林地Ⅰ土壤和草地Ⅲ土壤的水分垂直变化则属于“双峰”弱波动型。

(2) 同为黏土但植被类型分别为森林和草地的两样地的水分变异系数表现为：林地Ⅰ土壤(19.08%)>草地Ⅲ土壤(6.32%)，且植被类型主要对 0—60 cm 土层的土壤水分变异影响较大；粉沙性质地的林地Ⅱ土壤水分变异系数(30.81%)高于黏性壤土质地的林地Ⅰ土壤(19.08%)；土壤水分垂直变化主要受土壤质地和植被类型影响。

(3) 水源林区 3 个样地 0—300 cm 土层蓄水量表现为：草地Ⅲ土壤(1 215.46 mm)>林地Ⅰ土壤(1 106.29 mm)>林地Ⅱ土壤(682.34 mm)，说明土壤质地同为黏性黄土的草地Ⅲ土壤和森林Ⅰ土壤的水源涵蓄能力强，而沙性土壤质地的森林Ⅱ土壤蓄水能力较弱。

(4) 采用 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪法统计得出水源林区 3 个样地 0—160 cm 土层蓄水量表现为：Ⅲ(629.18 mm)>Ⅰ(571.6 mm)>Ⅱ(370.68 mm)；用环刀法测定的 3 个样地持水性能的结果表现为：0—160 cm 土层最大持水量为Ⅰ(9 997.5 t/hm^2)>Ⅲ(9 247.68 t/hm^2)>Ⅱ(9 238.34 t/hm^2)；毛管持水量表现为：Ⅰ(7 031.69 t/hm^2)>Ⅲ(6 707.11 t/hm^2)>Ⅱ(5 934.46 t/hm^2)；非毛管持水量为Ⅱ(3 303.88 t/hm^2)>Ⅰ(2 965.82 t/hm^2)>Ⅲ(2 540.5 t/hm^2)。可知，使用 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪测定的土壤蓄水量与用环刀法测定的土壤毛管持水量结果相符，通常测定的土壤蓄水量就是指土壤毛管持水量。

(5) 采用最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量 3 个指标来评价水源区土壤的水源涵养功能，最大持水量反映土壤涵蓄和调节水分的潜在能力，毛管持水量反映土壤保水能力的高低，维持土壤水分的动态平衡，非毛管持水量反映土壤调控地表水下渗、调节洪峰流量的能力小大。水源林区森林Ⅰ土壤、草地Ⅲ土壤涵蓄和调节水分能力较强，保水能力较高，能较好维持土壤水分动态平衡；森林Ⅱ土壤调蓄能力较强。

(6) 众所周知，环刀法是使用最广泛的土壤持水性能的测定方法，但此法比较耗时耗力。本研究同时采用环刀法和土壤水分速测仪法对 3 个样地持水量进行了测定，结果显示使用 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪测定的土壤蓄水量与用环刀法测定的土壤毛管持水量结果相符，说明便捷的 ThetaProbeML2x 土壤水分速测仪可用来测定土壤持水量，能快速评价土壤持水性能的强弱。研究中两种方法得到的实验数据可以进行相互验证，进行精度校正。另外，研究中发现，3 个样地的土壤水分垂直变化均为“双峰”波动型，说明哈尼梯田水源林区土壤具有较好的水源涵养和水土保持的功能。但是，通常从丰水年(雨季)到枯水年(旱季)，土壤水分垂直变化类型会从降低型向波动型转化，波动型向增长型转化，所以未来应深入研究水源林区土壤垂直变化的年际和季节性变异，为哈尼梯田景观的持续发展提供科学参考。

[参 考 文 献]

[1] 温远光，刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. 林业科学，1995，31(4)：289-298.

[2] 石培礼，吴波，程根伟，等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报，2004，19(3)：351-360.

[3] 王贺年，余新晓，李轶涛. 北京山区林地土壤水分动态变化[J]. 山地学报，2011，29(6)：701-706.

[4] 余雷，张一平，沙丽清，等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因子[J]. 生态学杂志，2013，32(2)：332-336.

[5] Crave A，Casuel O C. The influence of topography on the time and space distribution of soil surface water content [J]. Hydrological Processes，1997，11(2)：203-210.

[6] 陈波，剪文灏，吕发，等. 冀北山地蒙古栎天然林土壤物理性质及水源涵养功能研究[J]. 水土保持通报，2013，33(2)：83-86，92.

[7] 傅伯杰，陈利顶，邱扬，等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京：商务印书馆，2002：72-150.

[8] 张北赢，徐学选，刘江华. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式的土壤水分效应[J]. 水土保持通报，2005，25(6)：5-9.

[9] 王志强，刘宝元，张岩. 不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J]. 地理学报，2008，63(7)：703-713.

[10] 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.

[11] 邹俊亮，邵明安，龚时慧. 不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J]. 水土保持研究，2011，18(6)：12-17.

[12] 角媛梅. 哈尼梯田自然与文化景观生态研究[M]. 北京：中国环境科学出版社，2009：50-72.

[13] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统水环境观测规范[M]. 北京：中国环境科学出版，2007.

[14] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京：中国林业出版社，1993.