

# 哈尼梯田生态系统森林土壤水源涵养功能分析

白艳莹, 闵庆文, 李 静

(中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:**位于云南省哀牢山区红河南岸的红河哈尼稻作梯田系统是全球重要农业文化遗产之一,自上而下形成了垂直分布的“森林、村庄、梯田、河谷”四素同构的良性原始农业生态系统,使得该系统成功地抵御了多年的连续干旱。以哈尼梯田的核心区域撒马坝梯田上方的典型森林为对象,对其土壤水源涵养功能进行了系统分析和评价。结果表明,研究区平均土壤容重为  $1.09 \text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度为  $65.1\%$ ,非毛管孔隙度为  $18.7\%$ ,平均土壤蓄水容量达  $2\,589 \text{ t/hm}^2$ ,土壤滞留贮水量达  $739 \text{ t/hm}^2$ ,表层土壤平均初渗率达  $13.57 \text{ mm/min}$ ,稳渗率达  $7.22 \text{ mm/min}$ ,充分说明了该区域的土壤水热交换条件和土壤渗透性都十分良好。与我国其他区域森林相比,哈尼梯田森林具有很高的土壤水源涵养能力,是其适应极端干旱气候的重要保障,其模式可为我国适应极端气候变化减少农业经济损失提供重要的经验借鉴。

**关键词:**红河哈尼稻作梯田系统; 全球重要农业文化遗产; 土壤; 水源涵养; 极端干旱

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0166-05

## Water Conservation Function of Forest Soil in Honghe Hani Rice Terrace System

BAI Yanying, MIN Qingwen, LI Jing

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Honghe Hani Rice Terraces System, located in the Ailao Mountain area and the south of Honghe River in Yunnan Province, is one of the Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) sites. The vertical distribution of the Forest-Village-Terrace-River ecological landscape provides a well-functioning water conservation system, which makes it resist the continuous drought events successfully. The typical forest above the Samaba Terrace, core area of Honghe Hani Rice Terraces System, was taken as the study area. The soil water conservation functions of this area were analyzed and evaluated. The results show that the mean soil bulk density is  $1.09 \text{ g/cm}^3$ , the total porosity is  $65.1\%$ , the non-capillary porosity is  $18.7\%$ , the average soil water storage capacity is  $2\,589 \text{ t/hm}^2$ , the retention storage capacity is  $739 \text{ t/hm}^2$ , the average initial infiltration rate at the top layer is  $13.57 \text{ mm/min}$ , and the stable infiltration rate is  $7.22 \text{ mm/min}$ , which means that the condition for water and heat exchange is good, so does the soil permeability. Compared with the forests in other regions of China, Honghe Hani Rice Terraces System has significant soil water conservation ability, which guarantees its resilience to extreme drought events. This system can provide important experience to adapt to extreme climate change and reduce economic losses in agriculture.

**Keywords:** Honghe Hani Rice Terrace System; Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS); soil; water conservation; extreme drought

近年来,在全球气候变化的影响下,干旱等极端气候事件发生的强度和频率在许多地区均呈上升趋势,严重影响了人类的生存和社会可持续发展<sup>[1-3]</sup>。我国处于气候变化敏感区域,受全球气候变化影响显著,极端干旱发生频率正在不断增加<sup>[4-5]</sup>。农业是受气候变化影响最直接、最脆弱的部门,据报道,我国平

均每年因干旱损失粮食 200 亿 kg 以上<sup>[6]</sup>,气候变化导致的区域性干旱将成为我国未来农业生产愈来愈严重的挑战<sup>[7]</sup>。我国西南地区在 2009 年秋至 2010 年春遭受了有气象资料以来最严重的干旱,旱灾共造成直接经济损失达 190 亿元<sup>[8]</sup>。然而,在位于云南省哈尼梯田却拥有充足的水源保证生产和生活的需要,

收稿日期: 2015-04-24

修回日期: 2015-05-11

资助项目: 国家自然科学基金“哈尼梯田适应极端干旱的生态水文学机制研究”(31200376)

第一作者: 白艳莹(1977—),女,河南南阳市人,博士,助理研究员,主要从事生态农业、农业文化遗产,传统农业生态系统对气候变化响应研究。E-mail: baiyy@igsrr.ac.cn

通信作者: 闵庆文(1963—),男,江苏徐州人,博士,研究员,博士生导师,主要从事生态农业、农业文化遗产研究。E-mail: minqw@igsrr.ac.cn

使得该地区成功地抵御了持续干旱,这一特异现象引起了科学家们的关注<sup>[8-11]</sup>。

哈尼梯田位于云南省哀牢山区红河南岸,仅汉文字史料记载就有1300多年的历史,它是人与自然高度协调的良性循环的生态体系,也是可持续山地农业系统的典范<sup>[12]</sup>。由于其特殊的自然和人文景观,哈尼梯田于2010年6月14日被联合国粮农组织批准为全球重要农业文化遗产,2013年6月22日被联合国教科文组织列入世界遗产名录,2013年10月24日被国家林业局正式授牌为国家湿地公园。哈尼梯田自上而下的景观结构呈现出“森林、村庄、梯田、河谷”四素同构的垂直空间分布模式,是结构合理、功能完备、价值多样、自我调节能力强的复合农业生态系统。上方茂密的森林是哈尼梯田生态系统重要的水源地,形成无数的山泉、水潭、溪流,然后流入村庄和梯田,从而保障生活生产用水,形成了“山有多高,水有多高”的水源体系;村民居住在气候温和、冬暖夏凉的山腰地带;而村子的下方开垦层层梯田,既便于引水灌溉稻田,又利于从村里运送人畜粪便施于田间。梯田是沿着等高线依山逐级建造的,做到了最少动用土方和防止水土流失。哈尼梯田的森林具有巨大的贮水作用,饶碧玉等<sup>[13]</sup>的估算结果显示在哈尼梯田灌区的供水水源中森林作为涵养水源全年为灌区供水约30%。森林土壤的非毛管孔隙可暂时储存一部分重力水,不断补给河流,增加枯水期流量,发挥其调蓄功能<sup>[14]</sup>,这对哈尼梯田区域适应极端气候至关重要。尽管国内一些学者针对哈尼梯田水资源利用开展了初步研究,但对哈尼梯田生态系统森林土壤水源涵养功能的研究目前还比较缺乏。本研究选取哈尼梯田核心区域内的撒马坝梯田上方的典型森林土壤样地,分析了与土壤水源涵养能力相关指标,对其土壤贮水能力和渗透能力进行了评价。土壤贮水能力在一定程度上反映了森林植被水源涵养和理水调洪的作用,其结果可为揭示哈尼梯田适应极端干旱气候的机制提供重要科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

哈尼梯田广泛分布在红河、元阳、绿春及金平四县。其中红河县的梯田总面积达1万hm<sup>2</sup>之多,这些梯田各有特色,以撒玛坝梯田最为突出。撒玛坝梯田位于红河县中南部,宝华乡东部,离乡政府驻地2km,距红河县城37km,撒玛坝梯田共有900多hm<sup>2</sup>,共有4300多层梯田,位于海拔在600~1880m。撒玛坝梯田最高处,是落孔尖山,海拔2436m。

本研究选择撒马坝梯田和龙甲民俗特色村上方的森林为研究区域。

本研究区域属于亚热带季风气候类型,年平均气温11.9~18.9℃,最低气温6~9.7℃,最高气温17.2~19.5℃,≥10℃积温4013.6~5142.9℃,年降雨量200~1500mm,年日照总时数1780.4~2049.4h,年太阳总辐射120.03~128.744kJ/cm<sup>2</sup>,有效生理辐射60.649~64.026kJ/cm<sup>2</sup>。由于该地区日照充足,降雨丰沛,水资源相对丰富,热区资源优势明显,为作物的生长提供了有利条件,适宜种植水稻(*Oryza sativa* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)、木薯(*Manihot esculenta* Crantz)等农作物。

### 1.2 样品采集与分析

2012年7月份,在研究区的森林内沿海拔梯度选择了9个典型10m×10m样地,在每个样地选择了3个代表性的样方挖掘土壤剖面,将腐殖质层清除掉,用100cm<sup>2</sup>环刀按0—10,10—20,20—40cm的深度分层取5.1cm深的原状土,分析测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤渗透速度等指标。土壤比重采用比重瓶法测定<sup>[15]</sup>,土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重( $\rho_b$ )、总孔隙度( $\varphi$ )、毛管孔隙度( $\varphi_1$ )、非毛管孔隙度( $\varphi_2$ )均采用环刀法测定<sup>[16-17]</sup>。具体指标计算公式如下:

$$\rho_b = \frac{G}{V \times (1 + \theta)} \quad (1)$$

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \frac{G_t - G_h - G_s}{V} \times 100\% \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \varphi - \varphi_1 \quad (4)$$

式中: $\rho_b$ ——土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $G$ ——环刀内湿样重(g); $V$ ——环刀容积(cm<sup>3</sup>); $\theta$ ——样品含水量(%); $\rho_s$ ——土壤比重; $G_t$ ——吸水3h左右带土环刀重(g); $G_h$ ——环刀重(g); $G_s$ ——环刀内干土重(g)。

土壤渗透速度的测定采用环刀法<sup>[18]</sup>。根据土壤渗透试验的结果,获取土壤入渗特征参数初渗率和稳渗率。初渗率为最初入渗时段内的渗透量,本研究取最初入渗时间为1min;稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率。

土壤蓄水容量( $SW_t$ , t/hm<sup>2</sup>)、有效蓄容( $SW_{aw}$ , t/hm<sup>2</sup>)、和毛管持水量( $SW_r$ , t/hm<sup>2</sup>)采取如下公式计算获取:

$$SW_t = 10000 \times \varphi \times d \times \rho_w \quad (5)$$

$$SW_{aw} = 10000 \times \varphi_2 \times d \times \rho_w \quad (6)$$

$$SW_r = 10000 \times \varphi_1 \times d \times \rho_w \quad (7)$$

式中: $d$ ——土层厚度(m); $\rho_w$ ——水比重( $t/m^3$ )。

试验数据利用 Excel 和 SPSS 软件进行分析和处理。

2 结果与分析

2.1 土壤贮水能力

土壤在森林水分循环中起着重要的作用,其容重大小及孔隙状况则直接影响到土壤的蓄水性能及渗透性等。土壤容重可反映土壤的孔隙状况和松紧程度,其大小与降水、植被和土壤自身形成过程存在一定关系,是影响土壤环境水热交换的重要指标。分析结果(表 1)显示研究区 9 个样地土壤容重均值为  $1.09\text{ g/cm}^3$ ,变化范围为  $0.91\sim1.2\text{ g/cm}^3$ 。与其他区域相比较,土壤容重偏小,说明研究区域土壤有机质较高,土壤疏松,受到土壤侵蚀、人为干扰的影响小,水热交换条件好。不同层次容重间差异不显著。表层 0—10 cm 土壤与次层 10—20 cm 土壤容重差异很小,平均值分别为  $1.07,1.06\text{ g/cm}^3$ ,低于底层土壤(20—40 cm)的  $1.12\text{ g/cm}^3$ 。统计分析显示,土壤容重随海拔的升高而降低( $R^2=0.380$ )。

土壤孔隙度是影响土壤水文学过程最关键的指标之一。对森林生态系统而言,毛管孔隙度的大小反映了森林植被吸持水分用于维持自身生长发育的能力;而非毛管孔隙度的大小反映了森林植被滞留水分发挥涵养水源和削减洪水的能力。表 2 的分析结果表明,不同样地不同层次总孔隙度变化较大,在  $58.9\%\sim$

$78.7\%$ ,平均值为  $65.1\%$ 。不同层次土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度差别不显著,土壤毛管孔隙度的变化在  $41.0\%\sim51.6\%$ ,平均值为  $46.4\%$ ,土壤非毛管孔隙度在  $14.6\%\sim33.1\%$ ,平均值为  $18.7\%$ 。同样地不同层次土壤毛管孔隙度在总孔隙度的比例也有较大的变化,反映了土壤在空间和垂直尺度的异质性。总的来说,研究区土壤孔隙度很高,9 个样地总孔隙度平均值高达  $65.1\%$ ,且非毛管孔隙度在总孔隙度中所占比例较高( $28.8\%$ )。研究区森林保护较好,林地地表覆盖大量枯枝落叶层增加了土壤有机质,根系的穿插也使得土壤孔隙度显著增加,而根系死亡留下的空隙和根系周围的生物的活动都增加了周围土壤的非毛管孔隙,促使土壤形成良好结构,使土壤孔隙度和通气状况变好。

表 1 各个样地土壤样品的土壤容重  $\text{g/cm}^3$

样地	海拔/m	土层/cm			平均值
		0—10	10—20	20—40	
S <sub>1</sub>	2180.9	0.88	1.02	1.06	0.99
S <sub>2</sub>	2145.2	1.06	0.94	0.80	0.93
S <sub>3</sub>	2134.9	1.02	0.95	1.15	1.04
S <sub>4</sub>	2035.3	1.13	1.13	1.17	1.14
S <sub>5</sub>	2001.9	1.16	1.19	1.26	1.20
S <sub>6</sub>	1985.9	1.10	1.05	1.11	1.09
S <sub>7</sub>	1954.7	0.87	0.93	0.97	0.92
S <sub>8</sub>	1911.5	1.24	1.27	1.22	1.24
S <sub>9</sub>	1896.1	1.16	1.10	1.36	1.21
平均值		1.07	1.06	1.12	1.09

表 2 研究区内各个样地土壤样品的总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度 %

样地	总孔隙度			毛管孔隙度			非毛管孔隙度		
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
S <sub>1</sub>	65.7	78.7	58.9	43.9	45.5	42.3	21.8	33.1	16.5
S <sub>2</sub>	65.2	63.4	68.4	46.4	42.8	51.5	18.8	20.6	16.9
S <sub>3</sub>	69.5	63.1	65.4	49.8	43.8	50.8	19.6	19.3	14.6
S <sub>4</sub>	66.2	65.5	59.0	44.8	45.5	42.3	21.4	20.0	16.7
S <sub>5</sub>	64.7	64.4	61.3	49.8	49.8	45.7	14.9	14.7	15.6
S <sub>6</sub>	66.5	68.2	65.8	50.3	51.6	50.2	16.2	16.6	15.6
S <sub>7</sub>	65.3	63.0	61.4	48.2	43.4	41.0	17.1	19.7	20.4
S <sub>8</sub>	62.1	61.7	63.6	43.1	42.9	43.6	19.0	18.8	20.0
S <sub>9</sub>	64.8	67.4	68.8	47.8	50.3	45.2	17.0	17.2	23.6
平均值	65.6	66.2	63.6	47.1	46.2	45.9	18.4	20.0	17.8

表 3 列出了 40 cm 土层土壤贮水能力指标计算结果。研究区不同样地土壤厚度存在一定变化,40 cm 的土层厚度属于正常情况。计算结果显示,平均土壤蓄水容量高达  $2\,589\text{ t/hm}^2$ ,而与森林土壤涵养水源功能最密切的毛管持水量(土壤滞留贮水量)则高达  $739\text{ t/hm}^2$ 。一定土壤厚度条件下土壤的贮水能力则取决于暂时蓄存在非毛管孔隙中饱和土壤中的自由

重力水。在哈尼梯田区域,森林与梯田(农田)的覆盖比例约为 3 : 1,在森林土壤发挥其最大涵养功能时,可为梯田提供相对于约 220 mm 的灌溉量( $739\times0.3\text{ t/hm}^2=221.7\text{ mm}$ ),有效增加枯水期的径流量,为哈尼梯田适应干旱气候提供了有力的保障。

2.2 土壤渗透能力

土壤的渗透能力对地面径流量的调节和转换起

着决定作用,是反映森林水源涵养作用的重要指标。表 4 列出了反映土壤渗透能力相关指标的分析结果。不同样地不同层次土壤初渗率变化较大,从小于 1 到 30 mm/min 左右不等,随土壤深度的增加而降低,在 0—10,10—20,20—40 cm 三个不同层次土壤初渗率平均值从 13.57 降为 9.30,2.50 mm/min。表明研究区土壤渗透性能随土壤深度的增加而减弱,其原因应与森林对林地的改良作用随土壤深度的增加而减弱密切相关。土壤稳渗率变化情况与土壤初渗率相似,不同样地不同层次土壤稳渗率变化范围为 0.51~19.67 mm/min,三个土层平均值分别为7.22,4.03,1.81 mm/min。影响土壤入渗性能的因素众多,其中土壤质地和土壤结构是影响土壤水分入渗的

主导因素。该区域多为天然林,植被保护完好,林地枯落物储量较大,因而土壤渗透性能好。

表 3 研究区各样地土壤的蓄水容量、有效蓄容和毛管持水量

样地	有效蓄容和毛管持水量		
	蓄水容量	有效蓄容	毛管持水量
S <sub>1</sub>	2621	1741	880
S <sub>2</sub>	2654	1923	731
S <sub>3</sub>	2634	1953	681
S <sub>4</sub>	2497	1749	748
S <sub>5</sub>	2518	1910	608
S <sub>6</sub>	2663	2023	641
S <sub>7</sub>	2512	1736	776
S <sub>8</sub>	2509	1731	778
S <sub>9</sub>	2697	1884	813
平均值	2589	1850	739

表 4 研究区内各个样地土壤样品的渗透能力

样地	初渗率/(mm·min <sup>-1</sup> )			稳渗率/(mm·min <sup>-1</sup> )		
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
S <sub>1</sub>	29.17	12.30	1.32	19.67	11.21	1.07
S <sub>2</sub>	27.60	17.13	3.97	16.30	2.37	3.34
S <sub>3</sub>	22.04	16.05	4.48	6.59	3.08	2.34
S <sub>4</sub>	7.63	11.66	3.50	4.62	6.76	2.10
S <sub>5</sub>	8.05	4.08	1.52	4.15	1.19	3.95
S <sub>6</sub>	4.08	4.28	0.41	1.80	2.75	0.31
S <sub>7</sub>	12.20	4.27	2.22	7.75	4.31	1.42
S <sub>8</sub>	5.22	7.13	1.41	2.59	1.15	0.51
S <sub>9</sub>	6.11	6.83	3.70	1.53	3.41	1.22
平均值	13.57	9.30	2.50	7.22	4.03	1.81

3 讨论

森林土壤是森林生态系统最主要的涵养水源的贮库,其涵养水源的能力,主要取决于土壤和森林的综合状况,因而,在不同林型、树种及发育土壤的气候条件下观测到的土壤水源涵养能力常有较大的差别<sup>[19-27]</sup>。

表 5 总结了文献中一些关于森林土壤水源涵养能力分析的结果。总的来看,云南区域的森林较其他区域森林土壤水源涵养能力高,而本研究选取的红河哈尼梯田森林,无论是其最大贮水量还是有效贮水量,都高于其他区域森林土壤贮水能力。这些研究结果从侧面说明了哈尼梯田生态系统的优越性和适应极端干旱气候的机制。

表 5 不同森林样地表层土壤水源涵养能力对比(0—20 cm)

地点	最大贮水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	有效贮水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	来源与说明
昆明松华坝	894.1~1166	200.40~456.40	人工林地及次生林 <sup>[19]</sup>
滇中	798~996	153.2~695	混交林,灌木林,人工桉树林,青冈栎林 <sup>[20]</sup>
元阳梯田	951.2~1235.9	141.9~226.4	3 个研究区 12 个样地 <sup>[21]</sup>
金沙江流域	675.6~1232.4	118~268	云华混交林、华旱混交林、云南松纯林、圣诞树纯林、华山松纯林、旱冬瓜纯林 <sup>[22]</sup>
东部森林样带	781~1400	248~716	长白山、北京、会同、鼎湖山 9 种林型 <sup>[23]</sup>
晋西北黄土丘陵区	1064.7	77.5	落叶松 <sup>[24]</sup>
敖汉旗小流域	827~925	50~142	7 种不同林地类型 <sup>[25]</sup>
本研究	1238~1444	296~550	

长期以来,哈尼梯田区域形成了林—寨—田—河垂直分布的独特生态景观特征,系统中森林是梯田的

“天然水库”,是哀牢山梯田地区和周围农业稳定高产的重要保障,对该区生态系统的稳定性和持续性起到

了至关重要的作用。本研究结果证实了哈尼梯田森林子系统土壤具有很高贮水能力和渗透能力,具有较小的土壤容重,土壤孔隙度和通气状况良好,森林系统可有效增加枯水期的径流量,为哈尼梯田适应干旱气候提供了有力的保障。水资源短缺是世界上倍受关注的资源环境问题之一,哈尼梯田系统的水资源利用和保护模式值得借鉴,同时,对于我国亚热带山地的农业开发和可持续利用也具有重要的借鉴意义。

## 4 结论

哈尼梯田是全球重要农业文化遗产,上方茂密的森林在保障系统稳定与适应极端干旱气候方面发挥着重要作用。针对哈尼梯田核心区域内的撒马坝梯田上方的典型森林土壤水源涵养能力分析的结果表明,该区域森林土壤具有良好的结构,土壤容重为  $0.91 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度在  $58.9\% \sim 78.7\%$ ,非毛管孔隙度在  $14.6\% \sim 33.1\%$ ,土壤贮水能力高,平均土壤蓄水容量高达  $2589 \text{ t/hm}^2$ ,土壤滞留贮水量则高达  $739 \text{ t/hm}^2$ ,土壤渗透性能好,表层土壤平均稳渗率高达  $7.22 \text{ mm/min}$ 。不同森林样地表层土壤水源涵养能力对比分析结果表明本研究选取的红河哈尼梯田森林土壤贮水能力显著高于其他区域区域森林土壤。研究结果为揭示哈尼梯田适应极端干旱气候的机制提供了重要科学依据。

### 参考文献:

- [1] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000,81(3):417-425.
- [2] Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. Geophysical Research Letters, 2006,33, L24702, doi:10.1029/2006 GL027229.
- [3] Boyd R, Ibarra M E. Extreme climate events and adaptation :an exploratory analysis of drought in Mexico [J]. Environment and Development Economics, 2009, 14(3):371-395.
- [4] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 近 50a 西南地区极端干旱气候变化特征[J]. 地理学报,2011,66(9):1179-1190.
- [5] Han H, Gong D Y. Extreme climate events over northern China during the last50 years [J]. Journal of Geographical Sciences, 2003,13(4):469-479.
- [6] 高育峰. 干旱对农业生产的影响及应对策略[J]. 水土保持研究,2003,10(1):90-91,109.

- [7] 潘根兴,高民,胡国华,等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(9):1698-1706.
- [8] 冯相昭,杨萧语,周景博. 极端气候事件使水资源管理面临严峻挑战:西南地区大旱的启示[J]. 环境保护,2010(14):30-32.
- [9] 李英康,李靖,冯少辉,等. 哈尼梯田核心区水文要素变化特征分析[J]. 林业调查规划,2010,35(4):38-46.
- [10] 段顺琼,王静,徐志芬,等. 元阳哈尼梯田降水和蒸发量变化特征及趋势分析[J]. 节水灌溉,2011(11):9-12.
- [11] 饶碧玉,杨建荣,周彩霞,等. 元阳哈尼梯田灌区水资源供需平衡初步分析[J]. 人民长江,2009,40(5):28-32.
- [12] 角媛梅,杨有洁,胡文英,等. 哈尼梯田景观空间格局与美学特征分析[J]. 地理研究,2006,25(4):624-632.
- [13] 饶碧玉,周彩霞,王静,等. 哈尼梯田灌区水资源合理配置研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(6):38-41.
- [14] 寇韬,李春燕,宫照红,等. 水源涵养林研究现状综述[J]. 防护林科技,2009(5):59-62.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [18] 国家林业局. 林林土壤渗透率的测定[S]. LY/T1218-1999,1999.
- [19] 苗武,史正涛,陈骏,等. 松华坝水源地不同植被土壤特性及水源涵养功能[J]. 水土保持研究,2013,20(4):131-140.
- [20] 常龙芳,史正涛,曾建军,等. 滇中城市水源地森林枯落物及土壤持水特性[J]. 城市环境与城市生态,2013,26(1):33-40.
- [21] 王冲,祖艳群,李元. 元阳梯田区域不同植物群落枯落物及表层土壤水分涵养功能研究[J]. 中国水土保持,2011(5):43-46.
- [22] 彭明俊,郎南军,温绍龙,等. 金沙江流域不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):106-109.
- [23] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报,2011,31(12):3285-3295.
- [24] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型流域不同植被土壤蓄水能力研究[J]. 水土保持通报,2006,26(3):29-33.
- [25] 郭城峰,秦富仓,岳永杰. 敖汉旗小流域典型林地土壤蓄水能力研究[J]. 内蒙古林业科技,2009,35(2):6-9.
- [26] 于法展,张忠启,陈龙乾,等. 江西庐山自然保护区不同林地水源涵养功能研究[J]. 水土保持研究,2014,21(5):255-259.
- [27] 曾建军,史正涛,张华伟,等. 滇中城市水源地不同林型水源涵养功能评价[J]. 水土保持研究,2013,20(6):84-87,101.