

基于水量平衡模型的喀斯特石漠化区集雨水窖分析

毛龙富^{1,2}, 刘宏^{1,2}, 陈瑞永^{1,2}, 杨丽瑞^{1,2}, 涂淼鑫¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南大学 国际喀斯特联合研究中心, 昆明 650223)

摘要: 为了有效应用家庭集雨水窖解决喀斯特石漠化区人畜饮水困难问题, 基于泸西县 1959—2018 年降水数据, 利用降雨距平百分数等方法分析该地区年际、年内降雨变化特征; 通过实地调研该地区的用水、产流、贮蓄等情况, 运用水量平衡原理, 建立了日降雨—用水平衡模型, 着重探讨季风气候下不同旱涝年份降雨特征及其对水窖的影响, 揭示喀斯特山区家庭饮用水窖的最佳尺寸。结果表明: (1) 泸西县近 60 a 呈暖干化趋势, 年际降雨变化大, 干旱年出现频率为 20%; 年内降雨量分布极为不均匀, 雨季降雨量占 84.15%。(2) 按屋顶集雨面积为 100 m², 每户家庭用水量 0.159 m³/d, 模拟得出家庭水窖的最佳尺寸为 25 m³, 干旱年雨水利用率可达到 75.40%, 家庭水窖非极端干旱年有效供水率 $R_e \geq 95\%$, 常年供水率期望值 $E(C) = 95.19\%$, 每口水窖至少可以提供人畜饮用水 55.133 m³/a。通过设计最佳的集雨水窖, 提高雨水利用率和水窖供水率, 有效解决了气候变化下喀斯特石漠化区水资源日趋匮乏的瓶颈。

关键词: 喀斯特; 季风气候; 日水量平衡; 泸西; 集雨水窖

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)04-0218-08

Analysis of Rainwater Collection Cellar in Karst Rocky Desertification Area Based on Water Balance Model

MAO Longfu^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, CHEN Ruiyong^{1,2}, YANG Lirui^{1,2}, TU Miaoxin¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. International Joint Research Center for Karstology, Yunnan University, Kunming 650223, China)

Abstract: In order to effectively use rainwater in the family water cellar to solve the drinking water difficulties of people and animals in karst rocky desertification areas, based on the precipitation data of Luxi County from 1959 to 2018, the characteristics of rainfall variation in this area were analyzed by means of percentage of rainfall anomaly, and through in situ investigation in the area with water use, runoff production and storage in this area, etc. Based on the principle of water balance, a daily rainfall—water balance model was established, and the characteristics of rainfall in different drought and flood years under monsoon climate and its influence on water cellars were emphatically discussed, so as to reveal the optimal size of family drinking water cellars in karst mountainous areas. The results show that: (1) in the past 60 years, Luxi County showed a trend of warming and drying, with great inter-annual rainfall variation, and the occurrence frequency of drought years was 20%; the annual rainfall distribution was extremely uneven, with the rainy season accounting for 84.15%; (2) according to the roof rainwater harvesting area of 100 m² and the household water consumption of 0.159 m³/d, the simulation results show that the optimal size of the household water cellar is 25 m³, the annual rainwater utilization rate can reach 75.40%; except for extremely dry years, the effective water supply rate of the family cellar is $R_e \geq 95\%$, the expected annual water supply rate is $E(C) = 95.19\%$; and each cellar can provide at least 55.133 m³ of drinking water for human and livestock in a year. Through the design of the best household rainwater harvesting cellar, the utilization rate of rainwater and the water supply rate of the cellar are both improved, and the bottleneck of water resource shortage in the karst

收稿日期: 2020-08-07

修回日期: 2020-08-17

资助项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502502); 国家自然科学基金(41371040, 41571010)

第一作者: 毛龙富(1993—), 男(彝族), 四川西昌人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特水文水环境。E-mail: 1056906500@qq.com

通信作者: 刘宏(1963—), 男, 云南德宏人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事喀斯特研究。E-mail: hongliu@ynu.edu.cn

rocky desertification area under climate change is effectively solved.

Keywords: karst; monsoon climate; daily water balance; Luxi City; rainwater harvesting cellar

喀斯特地区因“二元三维性”^[1],地表水与地下水通过落水洞、竖井、裂隙与地下暗河紧密相连,地表水容易流失或深埋^[2],旱灾频繁。广大喀斯特地区,特别是分水岭地区以水窖解决或缓解人畜饮水问题^[3]。中国喀斯特分布面积约为 344 万 km²,占国土面积的 35.93%^[4],自 1997 年起启动“渴望工程”、“国家农村饮水解困工程”、“母亲水窖”、“爱民工程”等^[5]解决农村饮水问题。截至 2011 年底,云南省共建成 172.87 万口水窖,包括 101.81 万口生活性水窖^[6],以此解决人畜饮水和农业用水。但喀斯特地区水资源具有脆弱性、敏感性,近年来,随着全球气候变化和人民生活质量提高,特别是云南地区 2009—2012 年持续干旱,人畜饮水问题日趋严重。在季风气候控制下的喀斯特山区,研究集雨水窖的有效容积具有必要性及重要性意义。

目前,国内外主要通过水量平衡模型^[7]、水文学法^[8]、概率或随机法^[9]、线性规划法^[10]等来研究雨水的收集与利用。例如,Mun 等^[11]基于水量平衡模型,在韩国首尔建立了雨水收集系统(RWH),改进 RWH 系统设计和运行的设计参数(DPs),其中 DPs 包括降雨量、流域面积(屋顶面积)、收集效率、水箱容积和需水量。Sample 等^[12]利用雨水模拟分析程序(RASP)模型,评估了弗吉尼亚州分散的雨水补给来源和补给过程。在南非,家庭雨水收集利用已成为南非安全饮用水的一种长久选择^[13],恒定需水量条件下,结合降水量探讨水窖的最佳尺寸^[14]。在干旱半干旱地区的约旦,收集雨水被用来提供适合各种家庭和灌溉用途的水^[15]。Ghisi 等^[16]对巴西南部圣卡塔琳娜州住宅区使用雨水收集系统的经济可行性进行了评估。邢国平等^[17]基于日降雨—用水平衡模型,结合半干旱地区的降雨情况,建立了城市合理水窖尺寸。牛文全^[18]根据水量平衡原理,考虑雨水利用的年内分布,计算各时段的水量盈缺状况,确定了人畜饮水工程和农田补灌工程中雨水集蓄设施经济容积的计算方法。

在显著的季风气候控制下,在中国,特别是云南省境内高温干旱等极端气候现象不断频繁出现。喀斯特山区水窖雨水收集有着特殊且复杂规律,迄今为止,在该方面研究工作仍旧空缺。泸西县三塘乡连城村位于典型的喀斯特分水岭石漠化中心区,精心爱护的集雨水窖是该区域主要的人畜饮用水源,其他水源补给量甚少,是研究集雨水窖的理想场所。由此,本

研究基于云南省泸西县历年日降雨量和当地人畜饮水用水等方面,通过建立日降雨—用水平衡模型,兼虑集雨水文过程,对季风气候条件下喀斯特山区——云南省红河州泸西县石漠化区典型家庭集雨水窖最佳尺寸进行探讨。旨在为广大喀斯特地区保障人畜饮水安全、建设分散集雨供水工程提供科学参考。

1 研究区概况

泸西县位于滇东南,位于 103°30′—104°03′E, 24°15′—24°46′N(图 1),是典型的喀斯特石漠化县。境内的连城村处于典型喀斯特分水岭山区,平均海拔高度 2 310 m;属亚热带低纬高原季风气候区,受印度季风和东亚季风的双重影响,干湿季显著,湿季降雨是干季的 4 倍,年平均气温 12℃,年降雨量约 1 000 mm、蒸发量约 1 676 mm。该地区地表水易流失、地下水深埋难以取用,土壤浅薄、地表水资源十分匮乏,人均用水量约为云南省农村标准水平的 1/3^[19]。精心保护的集雨水窖水质较好,是全村人畜饮水的主要来源,用水窖率达 99%以上;另外,还有 2 个圆柱型的公共大集雨池,体积分别有约为 1 500 m³(直径 20 m,深 5 m),30 000 m³(直径 30 m,深 4 m),一般常年均有水,主要用于建筑业、农业和部分生活用水等,在极端干旱年以备用于人畜饮用水水源。家庭水窖集流面均为各家屋顶,集雨面积 50~300 m²,大多数在 100 m²左右,家庭水窖大小介于 10~45 m³。当地水窖使用寿命 30 a 以上,造建在 3 000~8 000 元/个,随着水窖尺寸的增加造价费用相应增加。全村总面积 26.42 km²,共计 650 户人,2012 年村民人均纯年收入 2 388 元,是典型的贫困山区。近年来,随着精准扶贫和乡村振兴等国家政策,人民生活质量日益提高,对水的需求增加,迫在建设最佳尺寸的水窖。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

历年日降雨量数据来源于中国国家气象局,包括 1959—2018 年的降水、气温数据。2018—2019 年验证需要的降水、水位数据分别来源于安置在屋顶的雨量计、安置在水窖(容积为 30 m³)里的水位传感器。通过对泸西县三塘乡进行入户问卷调查和实地考察,依据村民反馈的用水量情况记录连城村的人畜饮水、

集雨产流、集雨时间等数据。

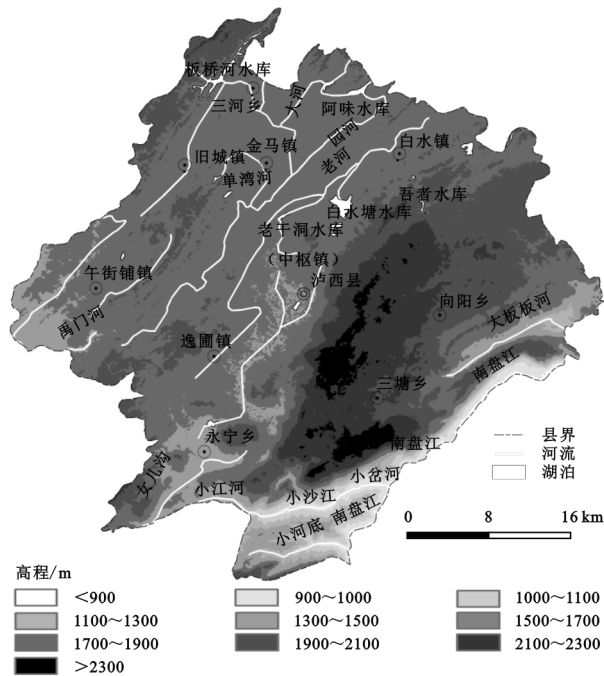


图 1 研究区高程

2.2 研究方法

(1) 降水量距平百分数 P_a [20-21]。

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为年降水量(mm); \bar{P} 为 1959—2018 年降水量平均值(mm)。降水量距平百分率的标准为, 无旱涝(平水): $-15 < P_a \leq 15$, 轻旱: $-30 < P_a \leq -15$, 中旱: $-40 < P_a \leq -30$, 重旱: $-40 < P_a \leq -45$, 特旱: $P_a \leq -45$, 轻涝: $15 < P_a \leq 30$, 中涝: $30 < P_a \leq 40$, 重涝: $40 < P_a \leq 45$, 特涝: $P_a > 45$ 。

(2) 逐日降水—用水平衡模型 [22-24]。根据 1958—2018 年的逐日降水数据, 结合考虑日降雨量(产流量)、日蓄水量、日溢流量和日用水量情况, 利用水量平衡模型, 计算出不同旱涝年份条件下, 农村家庭水窖的最佳尺寸。其具体方法为:

$$V_t = \frac{F \cdot P \cdot b}{1000} \quad (2)$$

$$S_{t+1} = S_t + V_{t+1} - D \quad (3)$$

$$\text{若 } S_t \leq 0, \text{ 则令 } S_t = 0 \quad (4)$$

$$\text{若 } S_t > C, \text{ 则令 } S_t = C \quad (5)$$

$$\text{若 } D > S_t, \text{ 则令 } U_w = D - S_t \quad (6)$$

$$\text{若 } S_t > C, \text{ 则令 } OF = S_t - C \quad (7)$$

$$S_0 + \sum_{i=1}^T V_i = S_E + OF + \sum_{i=1}^T D \quad (8)$$

式中: V_t 为第 t 天从集水面收集到的雨水量(m^3); F 为集流面积(m^2); P 为日降水量(mm); b 为加权产流系

数, 根据连城村的实际情况, 房顶的坡度较小, 集流面积为 $100 m^2$, 产流系数为 $0.84^{[25]}$; D 为每天的用水量(m^3), 包括家庭生活用水和畜牲饮水量。 S_t 是第 $t+1$ 天开始时水窖中的蓄水量(m^3); S_{t+1} 是第 $t+1$ 天结束时, 水窖中的蓄水量(m^3); C 是水窖的容积(m^3); U_w 是水窖蓄水量不足时需要外来水补给量(m^3); OF 为水窖溢出的雨水量(m^3); T 为一年的总天数(d); S_0 为年初水窖剩余水量(m^3); S_E 为年末水窖剩余水量(m^3)。

(3) 雨水有效利用率与水窖有效供水率。

$$W_p = \frac{1000D(T-u)}{F \cdot P_{\text{总}}} \times 100\% \quad (9)$$

$$R_e = \frac{T-u}{T} \times 100\% \quad (10)$$

式中: W_p 为雨水有效利用率; u 为水窖无水或不能满足用水需求的天数(d); $P_{\text{总}}$ 为收集年总集雨量; R_e 为满足每日用水量的水窖容积的有效供应率。

$$\xi(C) = \sum_{i=1}^4 q_i W_{pi} \quad (11)$$

$$E(C) = \sum_{i=1}^4 q_i R_{ei} \quad (12)$$

式中: $\xi(C)$ 为常年雨水有效利用率期望值; $E(C)$ 为家庭水窖常年有效供水率期望值; W_{pi} , R_{ei} 分别为各种类型年份(丰水、平水、干旱、极端干旱)雨水有效利用率、水窖有效供水率; q_i 为各种类型年份频率。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

泸西县 1959—2018 年的降水量呈减少趋势, 气温呈上升趋势, 意味着该地区近 60 a 趋于暖干化, 水资源情势日趋紧张。1959—2018 年平均降水量为 910.30 mm, 降水量的月间变化显著, 年内降雨量分布极为不均匀。雨季(5—10 月)降水量为 766.05 mm, 占年总降水量的 84.15%; 集中降水在夏季(6—8 月), 年平均 507.58 mm, 占年总降水量 55.76%。干季(11 月—次年 4 月)降水量为 144.25 mm, 仅占年总降水量的 15.85%; 冬季(12 月—次年 2 月)降水量最少, 仅 35.24 mm 占全年降水量的 3.87%。从 1959—2018 年的降水数据的距平百分数来看(图 2), 13 个丰水年即涝年(11 个轻涝、1 个中涝、1 个特涝), 降雨最丰富的年为 1961 年, 年降水量达为 1 360.5 mm; 12 a 为干旱年(9 个轻旱、2 个中旱、1 个重旱), 最干旱年为 2011 年, 年降水量仅为 522.3 mm, 比 1961 年降水量 1/2 还少; 无旱涝年(平水年)占 58.33% 即 35 个, 以 1993 年典型, 年降水量为 887.4 mm。

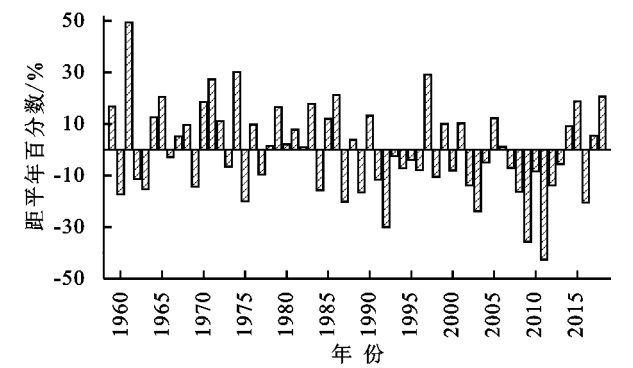
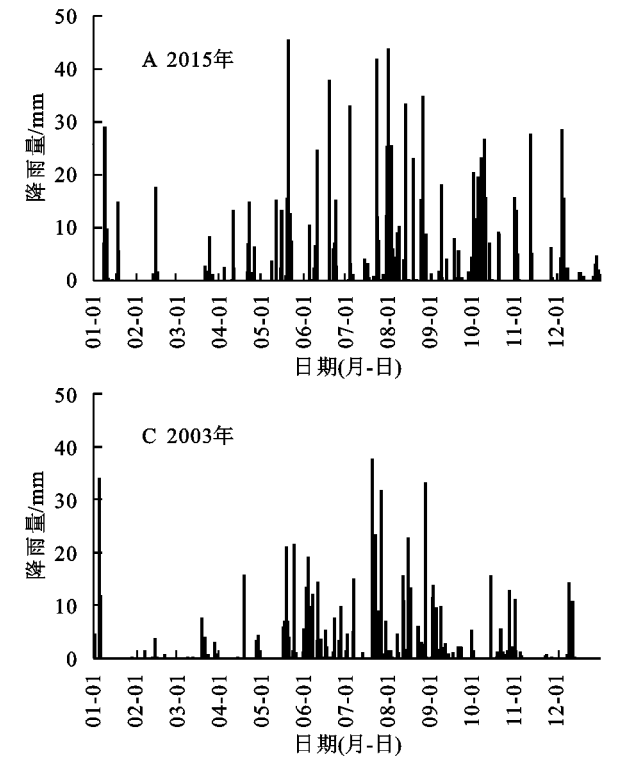


图2 1959—2018年降雨距平百分数

通过结合1959—2018年降雨数据,经降雨距平百分数的分类和年降雨量排序选择以2015年为涝年、1993年为平水年、2003年为干旱年、2011年为极端干旱年的典型代表(干旱决定着水窖尺寸的下限,为减少偶然性误差,故选择两个干旱年),这些年份分别是60a里的年降雨量排序的9/10、5/10、1/10和



最干旱的1a(1/60)。干旱年降雨天次数最少(表1),2011年中雨以上降水次数13次,2003年中雨以上降水次数25次;平水年降水次数介于干旱年与丰水年之间,中雨以上降水次数30次,其中包含1次暴雨;2015年中雨以上降水次数38次,约2011年的3倍,约1993年的4/3倍。2015年、1993年、2003年、2011年的日降水量如图3所示。

表1 各年日降雨次数情况

降雨强度/ (24 h·mm ⁻¹)	1993年	2003年	2011年	2015年
小雨或无雨($p<10$)	335	287	352	327
中雨($10\leq p<25$)	23	21	9	25
大雨($25\leq p<50$)	6	4	4	13
暴雨($50\leq p<100$)	1	0	0	0
大暴雨($p\geq 100$)	0	0	0	0

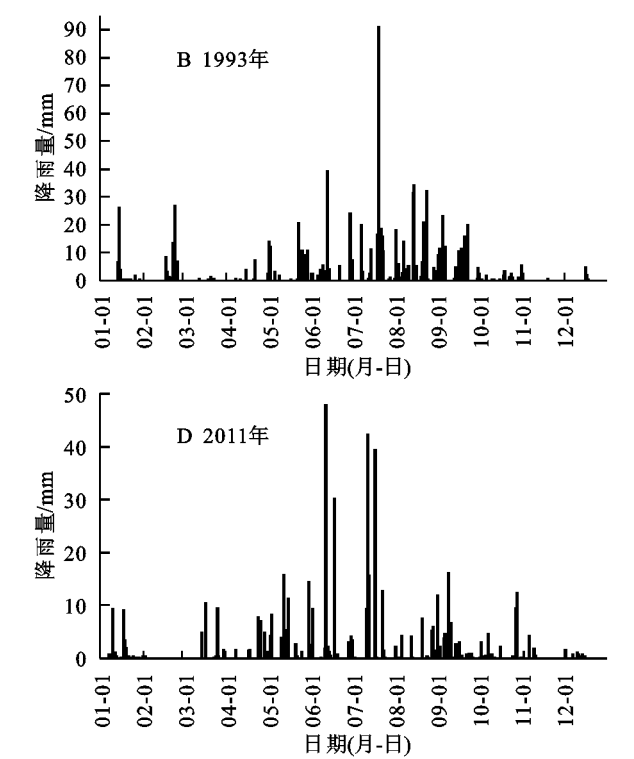


图3 季风气候下不同旱涝年份日降雨量特征

3.2 建立水窖日水量平衡模型

3.2.1 用水情况 根据泸西县入户访问得到的调查数据可知,人畜饮水和生活用水主要来源于大气降雨。当地用水主要分为两种,其中一种是人畜饮用水,包括人(含厨房用水)和家里牲畜的饮用水,全村主要来源于家庭集雨水窖;另一种是村民日常生活用水,如洗衣服、洗澡等,主要来源于村里公用大水窖、自来水。按照平均条件,每户人畜饮用水量按抽样调研的若干户平均水平进行计算,考虑到常住人口数和饲养牲畜数。根据当地实际情况,区域家庭平均用水量为0.030 m³/d,每头牛用

水量为0.055 m³/d,每匹马用水量为0.045 m³/d,每头猪用水量为0.025 m³/d,每只鸡0.001 m³/d。按照平均条件:每户常住人口5人,并饲养了1头牛、1匹马、1头猪、4只鸡的标准来计算,则每户日均人畜用水量为:0.030+1×0.055+1×0.045+0.025+4×0.001=0.159 m³,年需水量为D_Y=58.035 m³。

3.2.2 产流情况 依据实地调查数据可知,该地区水窖集雨方式都是通过人字形屋顶产流进行集雨,然后流入家庭水窖之中。在雨季来临之前,村民把屋顶打扫干净,全年均为集雨时间,其中主要集雨时间为

5—10 月。一般情况下,雨季的第一场雨($P \geq 10$ mm/d)不收集入水窖,一方面第一场雨水中含有屋顶的灰尘、杂质等;另一方面用于清洗水窖中的淤泥等。待水窖清洗干净,水量清空,雨季的第二场雨($P \geq 10$ mm/d)开始收集注入水窖。屋顶集水面积为 $25 \sim 200 \text{ m}^2$,水窖尺寸大小在 $15 \sim 40 \text{ m}^3$ 。其中,大多数村民的屋顶集水面积约为 100 m^2 ,故取 $F=100 \text{ m}^2$ 。通过日降水量、屋顶面积、泄漏、溢出和蒸发等,计算得到日集流量 $V_i=0.084P$,其中雨季 $P < 3 \text{ mm}$,干季 $P < 5 \text{ mm}$ 的均算作为无产流天数)。2015 年、1993 年、2003 年、2011 年的汇流潜力年降雨量分别为 973.90,790.00,631.00,414.20 mm。

3.2.3 水窖日水量平衡

(1) 水窖的集水时间。降雨具有时间性,每年的不同时段降雨概率与降水强度均不同,每年水窖收集雨水的时间也不尽相同。利用 2015 年和 1993 年、

2003 年、2011 年等年份的日雨量资料,以家庭日均用水量、日集雨产流量、水窖贮水量、水窖溢水量等条件建立日降水—用水量平衡模型。选择以 10,15,20,25,30,35,40,45 m^3 等不同的水窖尺寸为阈值;丰水年、平水年、干旱年、极端干旱年的年用水情况和效率。从而找出,在 60 a 内既能满足集雨要求,又能满足用水需求的最小容积,也就是家庭水窖的最佳尺寸。集雨时间由本年的雨季开始到次年雨季来临时结束,因此本年收集雨的水量供应到次年的旱季。2015 年、1993 年、2003 年、2011 年的收集雨水时间分别始于 2015 年 5 月 12 日、1993 年 5 月 3 日、2003 年 5 月 19 日、2011 年 5 月 16 日;次年分别始于 2016 年 5 月 24 日、1994 年 5 月 26 日、2004 年 4 月 18 日、2012 年 5 月 10 日;年集雨周期分别为 378,388,335,360 d(表 2),在研究中以每年收集周期为一年的代表即“收集年”。

表 2 水窖集雨、储水时间

年份	1993 年	2003 年	2011 年	2015 年
上一年年收集雨水日期(年-月-日)	1992-05-20	2002-05-13	2010-06-15	2014-05-02
时间间隔/d	348	371	335	375
本年收集雨水日期(年-月-日)	1993-05-03	2003-05-19	2011-05-16	2015-05-12
时间间隔/d	388	335	360	378
下一年年收集雨水日期(年-月-日)	1994-05-26	2004-04-18	2012-05-10	2016-05-24

(2) 水窖贮水量逐日变化过程。当 $C=10 \text{ m}^3$,2015 年、1993 年、2003 年、2011 年缺水天数均很多,分别有 54,124,70,141 d 出现水窖无水状态,主要连续出现在旱季的 1—4 月,发生在收集雨水的开始阶段和次年收集雨水前期(图 4)。当 $C=15 \text{ m}^3$,各年缺水天数均仍较严重,2015 年、1993 年、2003 年、2011 年缺水天数分别为 19,114,36,123 d,主要集中在旱季。当 $C=20 \text{ m}^3$,平水年、干旱年仍缺水,1993 年、2003 年、2011 年缺水天数分别为 50,7,123 d。当 $C \geq 25 \text{ m}^3$,2015 年和 2003 年均无出现水窖无水状况,当 $C=25 \text{ m}^3$,1993 年有 18 d 水窖无水状态,主要连续出现在 1993 年 5 月 12 日—5 月 22 日和次年 1994 年 5 月 1 日—3 日;2011 年有 123 d 水窖无水状态,主要连续出现在 2011 年 5 月 23 日—30 日、2011 年 12 月 19 日—2012 年 1 月 3 日、2012 年 1 月 8 日—3 月 4 日、3 月 14 日—4 月 7 日、4 月 18 日—5 月 5 日。当 $C=30,35,40,45 \text{ m}^3$ 时,1993 年、2015 年水窖枯水天数分别为 11,123 d,之后均未发生变化,生活用水分别需要外来补给水 1.749,19.577 m^3 。水窖无水天数主要集中在集雨开始(5 月)和次年旱季(1—5 月上旬)。在一定水窖尺寸阈值内,随着水窖尺寸的增加,水窖有效储集水量增加、提供的有

效利用水量增加(表 3)、溢出的水量减少(表 4);水窖无水天数相应的减少;但是水窖尺寸达到一定阈值后,水窖有效储集水量、有效利用水量、溢出的水量、水窖无水天数均与其无关,受控于集雨面积和降水(强度、时间)分布。

3.3 模拟水窖最佳尺寸

不同水窖尺寸在不同旱涝年份条件下的雨水有效利用率(图 5)。在相同的水窖尺寸下,雨水有效利用率总体上:丰水年(2015 年) $<$ 平水年(1993 年) $<$ 干旱年(2003 年) $<$ 极端干旱年(2011 年),雨水有效利用率与有效收集运用的雨水、年末水窖剩余水量、当年降水情况、渗漏等相关。2011 年雨水有效利用率达到最大值(80.04%)的水窖最小尺寸为 15 m^2 ,2003 年雨水有效利用率最大(75.40%)的水窖最小尺寸为 25 m^2 ,1993 年雨水有效利用率最大(68.02%)的水窖最小尺寸为 30 m^2 ;2015 年雨水有效利用率最大(58.27%)时,水窖最小尺寸为 20 m^2 。当 $C=25 \text{ m}^3$, $\xi(C)$ 可达 66.88%,当 $C=30 \text{ m}^3$, $\xi(C)$ 可达到 67.62%。雨水有效利用率大意味着当年对雨水需求量大,干旱年雨水的需求量最大,丰水年最小,平水年介于两者之间,当 C 在某阈值内, W_p 随着水窖尺寸的增大而增大;当 C 超过某阈值时, W_p 不再增大。

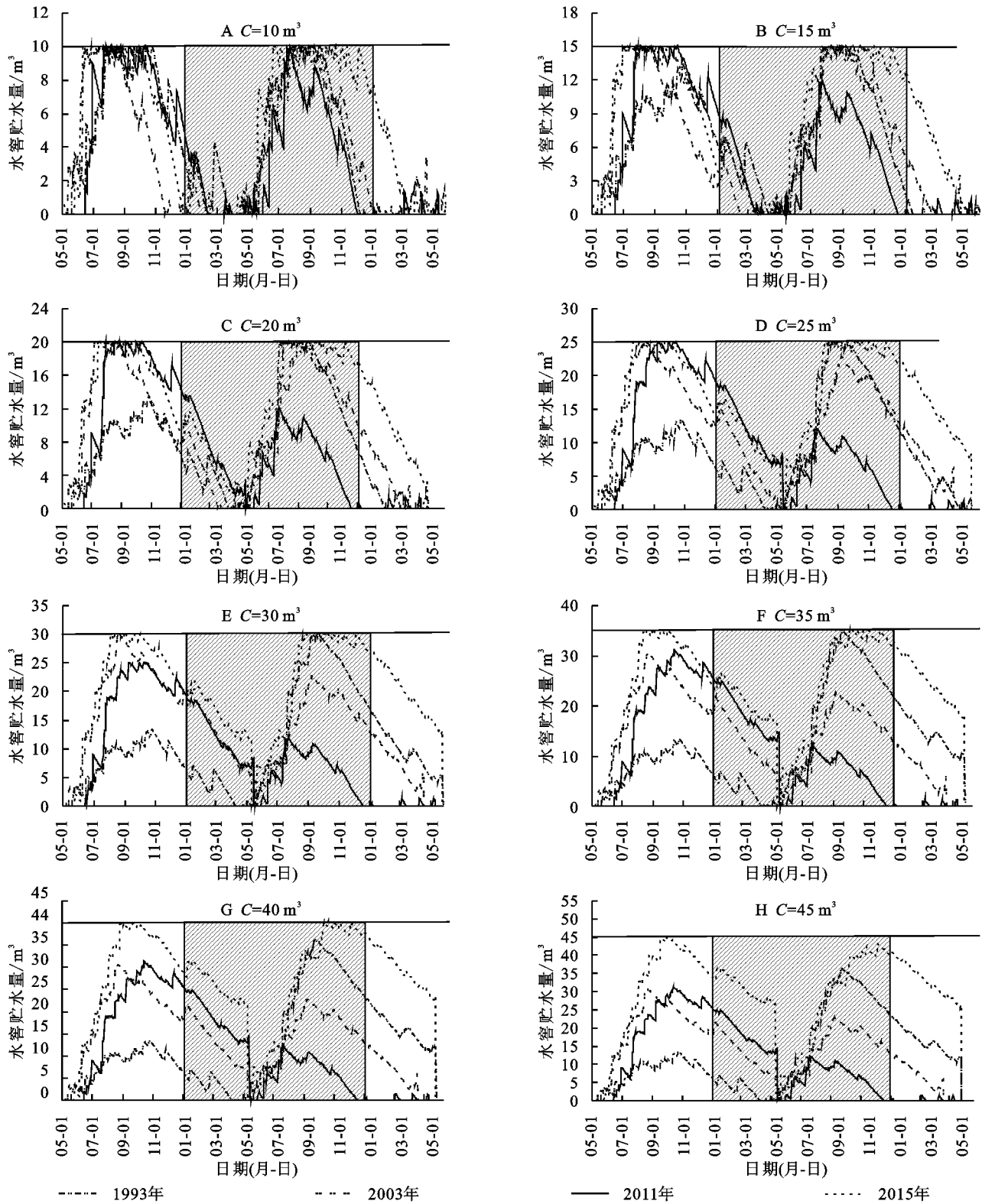


图 4 不同尺寸水窖日贮水量变化情况

不同水窖尺寸在不同旱涝年份(丰水年、平水年、干旱年、极端干旱年)下的水窖有效供水率不同(图 5)。当 $C=10 \text{ m}^3$, 2015 年、1993 年、2003 年、2011 年水窖供水率分别为 85.71%, 67.96%, 79.61%, 60.72%。当 $C=15 \text{ m}^3$, 2015 年、1993 年、2003 年、2011 年水窖供水率分别为 94.97%, 70.54%, 89.25%, 66.02%。当

$C=20 \text{ m}^3$, 2015 年、1993 年、2003 年、2011 年水窖供水率分别为 100.00%, 87.08%, 97.91%, 65.74%。当 $C=25 \text{ m}^3$, 2015 年、2003 年、2011 年水窖供水率已经达到最大值, 分别为 100.00%, 100.00%, 65.74%; 此时, 1993 年为 95.35%。当 $C=30 \text{ m}^3$, 1993 年的水窖供水率达到最大值 97.16%, 由于 1993 年 5 月 12 日—

5 月 22 日出现了 11 d 连续干旱天气,故 1993 年水窖供水率低于 2003 年。

表 3 窖水实际有效利用量 m³				
水窖容积/m ³	1993 年	2003 年	2011 年	2015 年
10	41.976	42.135	34.821	51.516
15	43.566	47.541	37.842	57.081
20	53.742	52.152	37.842	60.102
25	58.830	53.265	37.842	60.102
30	59.943	53.265	37.842	60.102
35	59.943	53.265	37.842	60.102
40	59.943	53.265	37.842	60.102
45	59.943	53.265	37.842	60.102

当 $C=25\text{ m}^3$,2015 年、2003 年、2011 年水窖供水率都达到最大值,其中丰水年(2015 年)需要 $C=20\text{ m}^3$;极端干旱年(2011 年)则只需要 $C=15\text{ m}^3$ 。当 $C=30\text{ m}^3$,1993 年达到水窖供水率最大值。当 $10\text{ m}^3\leq C<25\text{ m}^3$,常年水窖供应率期望值 $E(C)$ 均随着水窖尺寸的增大而提高;当 $C=25\text{ m}^3$, $E(C)$ 可达 95.59%,当 $C=$

30 m^3 , $E(C)$ 可达到 96.64%以上;当 $C>30\text{ m}^3$, $E(C)$ 不再随着水窖尺寸的增大而提高。在平水年(1993 年),水窖容积在 $C=25\text{ m}^3$ 比 $C=30\text{ m}^3$ 少收集有效利用水量 1.113 m^3 ;在干旱、丰水年均无变化; $\xi(C)$ 提高 0.74%, $E(C)$ 提高 1.05%。考虑到修筑成本和人工费,故家庭水窖最佳尺寸为 25 m^3 。水窖模拟水窖逐日贮水量(W)与实地监测水位(H)基本走势一致(图 6),证实了水量平衡模型的实效性。

表 4 水窖溢出水量 m³				
水窖容积/m ³	1993 年	2003 年	2011 年	2015 年
10	28.542	13.699	3.021	34.073
15	26.952	8.293	0.000	28.508
20	16.776	3.682	0.000	23.000
25	11.688	0.000	0.000	18.000
30	6.557	0.000	0.000	13.000
35	1.557	0.000	0.000	8.000
40	0.000	0.000	0.000	3.000
45	0.000	0.000	0.000	0.000

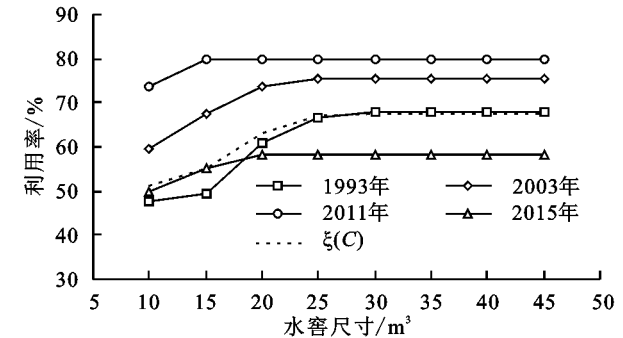


图 5 不同尺寸水窖雨水利用率、供水率

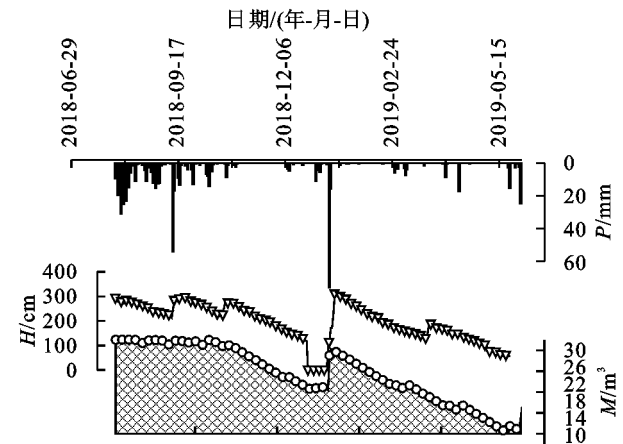
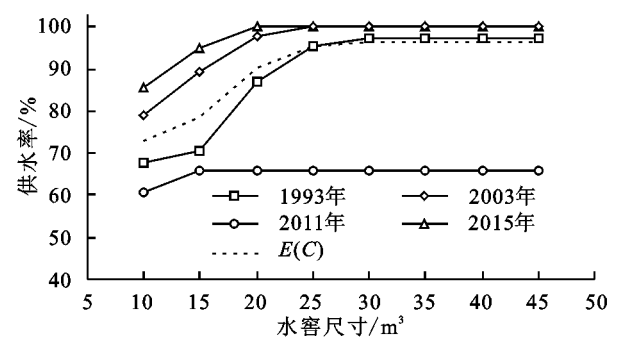


图 6 实地监测水位和模拟水量对比

4 结论

(1) 泸西县近 60 a 区域趋暖干化;降雨季节性变化大,干湿季分明显著;年降雨的 84.15%集中在雨季,区域降水量年际、年内季节性变化显著。依据降水百分数分析得出,该地区干旱年、平水年、丰水年分

别所占比例为 25.00%,58.33%,21.67%。
(2) 最佳集雨水窖尺寸取决于日均用水量、降水、日产流量、集雨时间等。基于水量平衡原理,建立日降雨—用水平衡模型,综合研究得出季风气候下集雨水窖最佳尺寸为 $C=25\text{ m}^3$ 。当 $C=25\text{ m}^3$,2015 年、1993 年、2003 年、2011 年等雨水有效利用率分别为 58.27%,66.76%,75.40%,80.04%;水窖供水率分别为 100%,95.35%,100%,65.74%,常年雨水利用率期望值 $\xi(C)$ 为 66.88%,供水可靠性期望值 $E(C)$ 可达 95%以上。
(3) 通过模拟设计出最佳尺寸水窖,提高了雨水的利用率、并满足人畜用水需求;在有效集雨条件下,建议 5 人家庭的水窖尺寸为 25 m^3 ,每口水窖至少可以提供人畜饮用水 55.133 m^3/a ,可解决喀斯特石漠化地区人畜饮水困难的问题。为广大喀斯特地区分散供水集雨工程建设提供科学依据。

致谢:感谢云南省泸西县村民赵林红等,在实地调研过程中的积极配合和热情帮助。

参考文献:

- [1] 郑长统,梁虹,舒栋才,等.基于GIS和RS的喀斯特流域SCS产流模型应用[J].地理研究,2011,30(1):185-194.
- [2] 牛素贞,宋勤飞,樊卫国,等.干旱胁迫对喀斯特地区野生茶树幼苗生理特性及根系生长的影响[J].生态学报,2017,37(21):7333-7341.
- [3] 章海生,史运良,俞锦标.高原分水岭型喀斯特径流过程模拟:以贵州普定县南部地区为例[J].中国岩溶,1987,(4):3-14,25.
- [4] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,34(18):5328-5341.
- [5] 杨华仙,桑钢,杨国林.关于农村饮水安全工程的思考[J].给水排水,2011,47(3):28-31.
- [6] 闵军,俞婷,李纯林.云南省水窖建设需求分析[J].城市建设理论研究,2013(29):1-4.
- [7] Fewkes A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalised approach [J]. Urban Water, 2000,1(4):323-333.
- [8] Lee J Y, Han M Y, Kim H. Review on codes and application of urban rainwater harvesting utilization: focused on case study in South Korea[J]. International Journal of Urban Sciences, 2010,14(3):307-319.
- [9] Lee K T, Lee C D, Yang M S, et al. Soil and water: Probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern systems [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000,77(3):343-348.
- [10] Okoye C O, Solyali O, Akintuğ B. Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach[J]. Resources Conservation & Recycling, 2015,104:131-140.
- [11] Mun J S, Han M Y. Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: Definition, sensitivity and verification[J]. Journal of Environmental Management, 2012,93(1):147-153.
- [12] Sample D J, Liu J. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture[J]. Journal of Cleaner Production, 2014,75(15):174-194.
- [13] Kahinda J M M, Taigbenu A E, Boroto J R. Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2007,32(15/18):1050-1057.
- [14] Allen J E, Haarhoff J. A proposal for the probabilistic sizing of rainwater tanks for constant demand: technical paper[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2015,57(2):22-27.
- [15] Abdulla F A, Al-Shareef A W. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan[J]. Desalination, 2009, 243(1/3):195-207.
- [16] Ghisi E, Schondermark P N. Investment feasibility analysis of rainwater use in residences[J]. Water Resources Management, 2013,27(7):2555-2576.
- [17] 邢国平,李爽,周建芝,等.基于日水量平衡模型的城市小区雨水池计算分析[J].水土保持通报,2013,33(2):120-123.
- [18] 牛文全.雨水集蓄设施经济容积的确定方法[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(8):125-129.
- [19] 顾世祥,张玉蓉,谢波,等.云南省用水定额标准制定研究[J].节水灌溉,2012,(11):46-49,54.
- [20] 牛佳田,邵学礼,周颖,等.基于气象干旱指标的黑龙江集贤县多年旱涝规律研究[J].中国防汛抗旱,2011,21(4):50-52,69.
- [21] 李青吉,李磊.1961—2010年汤阴气象干旱发生等级及频率研究[J].农业灾害研究,2012,2(4):61-63.
- [22] Walsh R P D, Lawler D M. Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time [J]. Weather, 1981,36(7):201-208.
- [23] Imteaz M A, Ahsan A, Shanableh A. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city[J]. Resources Conservation & Recycling, 2013,77:37-43.
- [24] Imteaz M A, Ahsan A, Naser J, et al. Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model [J]. Resources Conservation & Recycling, 2011, 56(1):80-86.
- [25] 申红彬,徐宗学,张书函,等.绿色屋顶降雨径流削减效果监测与过程模拟[J].农业工程学报,2020,36(5):175-181.