

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.022

邱婷, 沈雪, 蔡崇法, 等. 梯田蓄水效益估算方法探讨[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1).

QIU Ting, SHEN Xue, CAI Chongfa, et al. Discussion on estimation method of water storage benefit of terrace[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1).

梯田蓄水效益估算方法探讨

邱婷¹, 沈雪^{2,3}, 蔡崇法¹, 户小会^{2,3}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079;

3. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079)

摘要: [目的] 综合考虑梯田土壤性质、梯田形态以及降雨雨型的差异, 构建梯田蓄水保水效益的估算方法及框架。[方法] 运用土壤水库计算模型与入渗模型, 探讨蓄满产流和超渗产流模式下梯田土壤水分的预测方法; 基于 Richards 方程, 分析不同田坎边界的土壤水分入渗二维分异。在此基础上, 进一步对前峰型、均匀型、后峰型、阶梯型 4 种降雨雨型下产生的单一产流模式或两种产流模式均存在时土壤水分运动进行情景分析。[结果] (1) 提出梯田蓄水效益分布式估算方法, 计算单个梯田田块土壤最大蓄水容量(W_M); (2) 对不同田坎类型的梯田而言, 浆砌石坎梯田防侧渗效果最好, 土坎梯田防侧渗效果最差, 且孔隙大、密度小、修筑时间短的新土坎梯田比修筑时间长的土坎梯田在发生侧渗时损失水分更多; (3) 得出不同雨型下蓄满产流的临界时间(t)。[结论] 该估算方法可大幅度降低对野外设施、设备的依赖程度, 降低投入成本, 借助野外调查采样, 基于模型模拟估算梯田蓄水效益。此外, 该方法可根据单个梯田田块蓄水效益分布式计算数据, 在区域尺度上估算梯田蓄水保水效益, 以为不同区域梯田的蓄水效益估算提供参考。

关键词: 梯田; 降雨雨型; 产流; 蓄水效益; 入渗

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

Discussion on Estimation Method of Water Storage Benefit of Terrace

QIU Ting¹, SHEN Xue^{2,3}, CAI Chongfa¹, HU Xiaohui^{2,3}

(1. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China;

3. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: [Objective] On the basis of considering the differences of soil property, terrace form and rainfall type, we aimed to establish the estimation method and framework of water storage and retention efficiency of terrace. [Method] By using soil reservoir calculation model and infiltration model, we explored the prediction methods of soil water distribution in saturation-excess runoff and infiltration-excess runoff. Moreover, based on the Richards equation, we analyzed the two-dimensional infiltration of soil profiles at different field and ridge boundaries. On this basis, we constructed the scenario of soil water movement under single runoff generation mode or two runoff generation modes under four types of rainfall patterns, including pre-peak rainfall, uniform rainfall, post-peak rainfall, and stepped rainfall patterns. [Result] We proposed the distributed estimation method of soil water storage efficiency of terrace field, and the maximum water storage capacity (W_M) of soil in a single terraced field was calculated. For different types of terraces, the anti-lateral seepage effect of stone walled bench terrace was the best, and the anti-lateral seepage effect of earth banked terrace was the worst, and the new soil ridge terrace with large pores, small density and short con-

收稿日期: 2023-07-15 修回日期: 2023-08-21 录用日期: 2023-09-10

资助项目: 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202323); 国家自然科学基金项目(42207529, 41630858); 中国博士后科学基金面上资助项目(2022M721289)

第一作者: 邱婷(2001—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: qjut1206@163.com

通信作者: 沈雪(1992—), 女, 讲师, 主要从事资源与环境科学研究。E-mail: xueshen@cnu.edu.cn

struction time lost more water than the soil ridge terrace with long construction time. The critical time (t) of full flow production under different rain patterns was obtained. [Conclusion] This estimation method could greatly reduce the dependence on field facilities and equipment, and reduce the input cost. With the help of field investigation and sampling, the efficiency of terraced water storage could be estimated based on model simulation. In addition, the method could be used to estimate the water storage efficiency of terrace on a regional scale according to the distributed calculation data of the water storage efficiency of a single terrace field, and provided a reference for the estimation of the water storage efficiency of different regional terraces.

Keywords: Terrace; rainfall type; runoff generation; efficiency of water storage; infiltration

Received: 2023-07-15

Revised: 2023-08-21

Accepted: 2023-09-10

坡改梯是丘陵山区主要的整地模式,通过在丘陵山区沿等高线修筑梯坎,形成田面水平或者坡度较缓的条状或者波浪式阶梯式田块。梯田可以有效减缓原坡地的坡度、缩短坡长,降低地表径流流速与土壤侵蚀,从而局部提高有效土层厚度和蓄水能力。近年来,国家先后出台了坡耕地水土流失综合治理工程、黄土高原固沟保塬工程等水土流失治理专项工程。大规模梯田的修筑或整修在稳定耕地面积、保护区域生态安全方面取得了明显的积极作用。

目前,梯田的建设技术标准及方法已经比较成熟,有关梯田蓄水保水效益的定性研究以及定量个案研究也较为丰富。部分研究从定性的角度研究发现,梯田可改变地面坡度、高效利用降水,具有较高的蓄水保水能力^[1-4]。多数研究利用定量的方法进行分析,通过布设径流小区,采用梯田与坡地年径流量之比来量化蓄水保水效益。如在黄土高原地区,水平梯田的蓄水效益均值为 86.7%^[5];在红壤区试验得到坡改梯后梯田蓄水效益可达 68.3%^[6];而北方土石山区通过分析梯田修筑前后年径流量的变化,得到梯田蓄水效益为 45%^[7]。可见,在不同区域计算所得梯田蓄水效益结果相差较大,且尚未形成一致的估算方法。对梯田田块蓄水效益进行更加精确的计算,构建梯田蓄水保水效益评估方法框架很有必要,这对于科学评估梯田生态效益具有重要的意义。

本文基于土壤水库计算模型与入渗模型,探讨蓄满产流和超渗产流模式下梯田土壤水分分布,提出梯田的蓄水效益分布式估算方法,以及考虑不同田坎边界的土壤剖面二维入渗。根据雨型划分,探讨不同降雨雨型下土壤水分特征,以期能为坡改梯蓄水保水效益的科学估算,及梯田建设规划与设计提供理论依据。

1 梯田蓄水保水效益评估方法框架

土壤蓄水效益受土壤容重、孔隙度、土壤质地等土壤性质,以及降雨雨型等多种因素的影响。在坡改梯区域,土壤的蓄水效益还会受梯田结构类型、土层

厚度、土地利用类型、地形等因素的影响。质地为黏质的土壤,因孔隙较小,其土壤蓄水能力较好;而砂质土因孔隙大,入渗性能较好但土壤蓄水能力较差。此外,受土层厚度的控制,梯田土壤蓄水量存在着田块内部自外侧到内侧呈递增的变化趋势。降雨作为入渗和径流的主要来源,雨型差异也是导致土壤蓄水保水能力不同重要因素^[8-9]。

关于梯田蓄水效益差异的已有研究重点关注结构类型、地形、土地利用方式等因素。结果发现,水平梯田的蓄水保水能力优于其他类型梯田^[10];高坡部位的梯田由于地势较高,降水不易停留,其土壤保水效益较差^[11]。少有研究综合考虑上述各因素对梯田蓄水效益的影响,且评估单个梯田田块的蓄水效益的研究也相对较少。因此,为深入探讨梯田田块内部差异以及降雨类型可能引起梯田蓄水效益的不同,本研究提出了梯田蓄水效益评估框架(图 1)。该框架综合考虑了梯田土壤性质、梯田形态以及降雨雨型,以单个梯田田块为对象,基于模型模拟,在蓄满产流和超渗产流模式下,对梯田土壤蓄水效益进行分布式计算、土壤水分二维入渗分析,以及对不同雨型下产流临界时间和径流量进行分析。

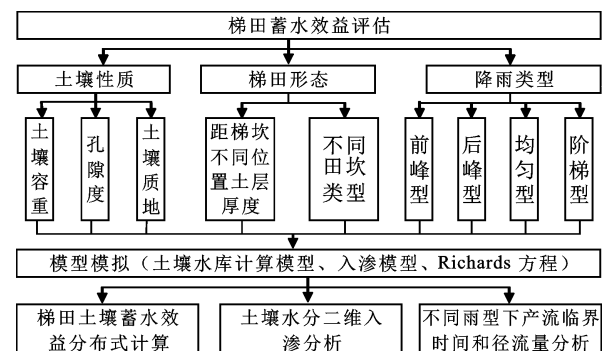


图 1 梯田蓄水效益评估框架

Fig. 1 Evaluation framework for terraced water storage benefits

2 梯田土壤蓄水效益分布式计算方法

降雨是地表径流的主要来源,梯田中土层厚度、土壤类型、土壤质地以及水力性质的不同可改变产流

模式(蓄满产流、超渗产流)并进而造成蓄水效益的差异。此外,梯田不同的田坎建筑材料,将影响降雨过程中梯田剖面土壤水分二维入渗和防侧渗能力,进而引起梯田蓄水效益变化。因此,在研究特定区域梯田

的蓄水效益时,应综合考虑梯田土壤类型、土壤质地、土层厚度、田坎材料。以水平梯田示意图为例,根据实际田面宽度、田坎高度布设计算点,计算梯田土壤蓄水效益。

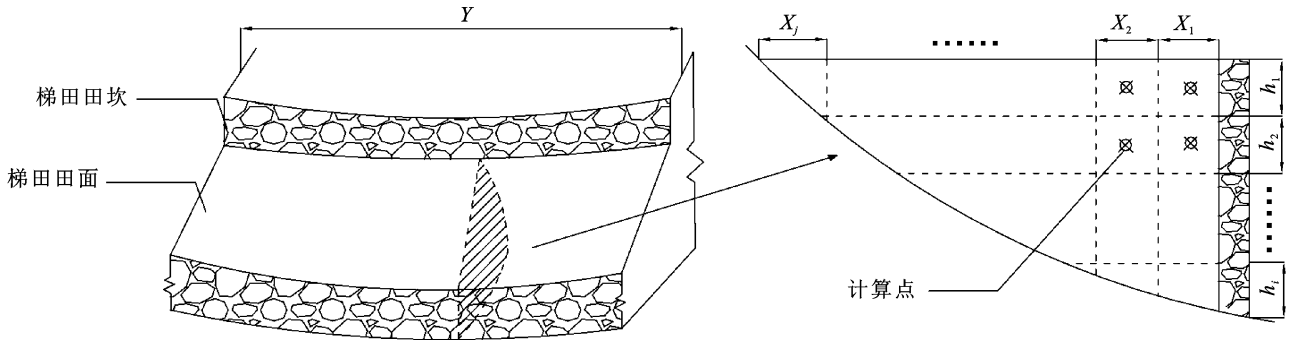


图 2 梯田示意

Fig. 2 Terrace diagram

2.1 蓄满产流

在蓄满产流模式下,土壤含水量达到田间持水量才会产流^[12]。产流量为:

$$R = \begin{cases} 0 & P + W_0 \leq W_M \\ P + W_0 - W_M & P + W_0 > W_M \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为产流量(mm); P 为降雨量(mm); W_0 为土壤前期含水量(mm); W_M 为土壤最大蓄水容量(mm)。

某土层厚度的土壤蓄水容量 W 表示为:

$$W = \int_0^h \theta(h) dh \quad (2)$$

式中: W 为某土层厚度(h)的土壤蓄水容量(mm); $\theta(h)$ 为某时刻地表以下一定深度(h)的土壤含水量(mm)。

对于梯田蓄水容量,使用土壤水库兴利库容的计算方法来表示梯田土壤最大蓄水容量,用田间持水量与萎焉系数之差来表示。在实际梯田蓄水容量计算情况中,为简化计算,将垂向土层厚度分为 k 层、横向田面沿垂直等高线方向分为 n 段进行计算,故某块梯田土壤最大蓄水容量 W_M (m^3) 为:

$$W_M = \left[\int_1^n dj \int_1^k (C_{ij} - Wl_{ij}) r_{ij} h_i X_j di \right] Y \times 10^{-4} \quad (3)$$

在实际情况中,计算点个数为有限个,则某块梯田土壤最大蓄水容量 W_M 可以用 W_{MS} 表示:

$$W_{MS} = \left[\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (C_{ij} - Wl_{ij}) r_{ij} h_i X_j \right] Y \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中: n 为横向田面沿垂直等高线方向分段数; k 为垂向土层厚度分段数; C_{ij} 为土壤垂向第 i 层、横向第

j 段田间持水量(%); Wl_{ij} 为土壤垂向第 i 层、横向第 j 段凋萎点含水量(%); r_{ij} 为垂向第 i 层、横向第 j 段土壤容重; h_i 为第 i 层有效土层厚度; X_j 为梯田横向田面沿垂直等高线方向第 j 段宽度(m); Y 为梯田田面长度(m)。

2.2 超渗产流

降雨过程中,降雨强度大于土壤下渗能力时,为超渗产流。当降雨强度小于下渗能力时,降雨全部下渗到土壤中,地面不产生积水;当降雨强度大于下渗能力时,降雨分为两部分,一部分按照下渗能力下渗到土壤中,补充土壤含水量;另一部分则留在了地面,形成超渗地表径流^[12]。

产流量:

$$R = \begin{cases} 0 & I \leq f(t) \\ I - f(t) & I > f(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: R 为产流量(mm); I 为雨强(mm/h); $f(t)$ 为土壤下渗能力(mm/h)。

采用霍顿下渗公式计算土壤下渗能力:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-Kt} \quad (6)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t f_c + (f_0 - f_c) e^{-Kt} dt \quad (7)$$

$$F(t) = f_c t + \frac{1}{K} ((f_0 - f_c) - \frac{1}{K} (f_0 - f_c) e^{-Kt}) \quad (8)$$

式中: $F(t)$ 为累积下渗量(mm); f_c 为稳定入渗率(mm/h); f_0 为初始入渗率(mm/h); K 为入渗系数。

当一场降雨中土壤累积下渗量大于最大累积下渗量,即 $F(t) + W_0 > W_M$ 时,土壤含水量达到田间含水量,土壤蓄满水,多出的水成为地下径流。

2.3 不同田坎边界的二维入渗分析

降雨条件下的梯田剖面土壤水分运动属于二维饱和一非饱和达西流运动,不考虑土壤入渗过程中空气阻力对入渗水流的阻碍作用。土壤水分运动简化为垂向入渗和向梯田田坎一侧侧向入渗的二维运动模型,模型采用 Richards 方程描述水分运动情况:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad (9)$$

式中: θ 为土壤含水率 (cm^3/cm^3); t 为入渗时间 (min) $K(h)$ 为非饱和导水率 (cm/min); h 为土壤压力水头 (cm); x 为水平坐标距离 (cm); z 为水平坐标距离 (cm)。

使用 HYDRUS-2D 软件模拟土壤水分二维渗流,软件运行时需要设置土壤水分特性参数、初始条件和边界条件。土壤水力特性参数选用 HYDRUS-2D 提供的 van Genuchten-Mualem 公式计算:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (11)$$

其中:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

式中: θ_s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); θ_r 为土壤残余含水率 (cm^3/cm^3); K_s 为土壤饱和水力传导度 (cm/min); S_e 为土壤的相对饱和度; m 、 n 、 α 均为拟合参数, l 取 0.5。

降雨开始时由于土壤剖面含水量变化很小,故设置初始条件时,认为土壤初始含水量均匀分布:

$$\theta(x, z) = \theta_{0i} (t = 0, i = 1, 2, 3, \dots, i) \quad (13)$$

式中: $\theta(x, z)$ 表示土壤含水率 (cm^3/cm^3); θ_{0i} 为土壤残余含水率 (cm^3/cm^3); i 表示土层。

梯田田面直接与大气相通,故设定为大气边界条件,大气边界条件用降雨强度代替;模拟梯田二维入渗过程中认为地下水埋深较大,故不涉及地下水位问题,因此研究梯田田块下界面为自由排水边界;当研究的梯田田坎类型为浆砌石梯田时,认为梯田田坎一侧边界为零通量边界,当研究的梯田田坎类型为土坎梯田时,认为梯田田坎一侧边界为自由排水边界。

参考袁志明等^[13]的研究,在相同的入渗时刻,零通量边界一侧的湿润锋运移距离明显小于自由排水边界,且相比于土坎,浆砌石坎的湿润区域范围减小,防侧渗效果更好。对其他田坎类型的梯田来说,例如

石坎梯田、干砌石梯田、植物篱梯田,因为建筑材料以及植物根系吸水作用,其防侧渗能力高于普通土坎梯田,低于浆砌石梯田。对土坎梯田来说,田坎的紧实程度、土壤质地、孔隙度、修筑时间长短等也都可能影响侧渗通量,孔隙大、密度小、修筑时间短的新土坎梯田比修筑时间长的土坎梯田在发生侧渗时会损失更多的水分^[14]。

2.4 估算模型中参数取值讨论

在蓄满产流和超渗产流情况下的土壤蓄水能力计算中,气象数据例如雨强 I 、降雨量 P 均可来源于当地气象资料。田间持水量 C_i 、凋萎点含水量 WL_i 、土壤容重 r_i 、稳定入渗率 f_c 、初始入渗率 f_0 、入渗系数 K 等参数可通过室内实验测得或取经验值。van Genuchten-Mualem 公式所需参数由模型自带的神经网络模块根据实测的土壤粒径、容重参数预测而得,或依据实际梯田土壤质地从模型自带数据库中选择。土壤含水量以及土壤入渗速率与土壤质地、土壤容重、孔隙度具有显著相关性,土壤水分的入渗能力与土壤容重呈负相关,土壤容重越大,入渗速率越小。土壤入渗能力同样受孔隙情况和土壤质地的影响,在超渗产流情况中,砂粒含量越高,总孔隙度越大,入渗能力 f 、稳定入渗率 f_c 越大,雨水入渗的速度越快,从而能更好地促进土壤水分入渗^[15-16]。

我国的梯田主要集中分布在黄土高原区、北方土石山区、南部丘陵地区和云贵高原区^[17]。不同区域梯田土壤中的水分和空气与外界变化的方式与程度的差异,会引起土壤内部结构的变化,直接影响各参数的取值范围,进而造成梯田土壤蓄水效益间的差异。

黄土高原区土壤类型以黄绵土为主,土壤质地多为粉砂质,土质疏松,容重较大、大孔隙较少,修筑的梯田土地利用类型主要为农田和果园,土壤蓄水能力中等。北方土石山区土壤以褐土为主,土壤质地为壤质、砂质,含较多砾石而疏松多孔,土层较薄,修筑的梯田土地利用类型多为耕地和果园,土壤蓄水能力差

南方丘陵区土壤以红壤为主,土壤质地因母质而异,以第四纪红壤面积较多,质地黏重,土层较厚,土壤容重大、孔隙度低,修筑梯田土地利用类型以耕地和果园、茶园为主,土壤蓄水持水能力好,但蓄水过程较慢。云贵高原区土壤类型主要为黄壤和石灰土为主,土壤质地以轻黏土、壤土为主,土壤容重较小、孔隙度较高,梯田土地利用类型多为林地和耕地,土壤蓄水持水较好。我国梯田分布典型区域的土壤质地、土壤容重、孔隙度情况见表 1。

表 1 梯田分布典型区域的土壤物理性质选取

Table 1 Soil physical properties in typical area of terrace distribution

梯田分布区	研究区域	土壤类型	土壤质地	土壤容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	文献来源
黄土高原区	甘肃省定西市龙潭小流域	黄绵土	砂粉土	0.98~1.13	41.71~52.92	WEI 等 ^[18]
	陕西省延安市碾庄沟小流域	黄绵土	砂粉土	1.38~1.41	45.62~47.07	包耀贤 ^[19]
北方土石山区	山东省沂水县沂水流域	棕壤	轻砂土	1.59	40.91	张宇恒等 ^[20]
	山东省平邑县九间棚小流域	棕壤	砂粉土	1.12~1.32	29.2~32.4	陈新军等 ^[21]
南方丘陵区	江西省德安县燕沟小流域	红壤	壤土、轻黏土	1.28~1.34	48.46~50.96	张靖宇 ^[22]
	江西省泰和县老虎山小流域	红壤	壤土	1.11~1.13	50.92~56.22	胡建民等 ^[6]
云贵高原区	云南省元阳县红河流域	黄棕壤、黄壤	壤土	0.61~1.17	47.05~57.99	李源等 ^[23]
	云南省云阳县全福庄小流域	黄壤	壤土	1.02~1.16	50.88~61.37	刘澄静等 ^[24]

3 不同降雨雨型下梯田蓄水效益计算方法

降雨条件下,湿润的土壤易发生蓄满产流,干燥的土壤易发生超渗产流。但在实际情况中,由于土壤性质和降雨雨型对入渗、径流和侵蚀过程的影响,即使降雨量相同或相似,土壤蓄水产流特征也有较大差异^[25],常会在一场降雨中既发生蓄满产流也发生超渗产流。降雨雨型划分方法参考 WANG 等^[26]和杨国强等^[9]的研究,将降雨按雨强的分布变化分为四类:前峰型降雨、均匀型降雨、后峰型降雨、阶梯型降雨(图 3)。结合降雨时土壤发生超渗产流和蓄满产流情况:

$$\text{超渗产流: } R = \begin{cases} 0 & I \leq f \\ I - f & I > f \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{蓄满产流: } R = \begin{cases} 0 & P_t + W_0 \leq W_M \\ P_t + W_0 - W_M & P_t + W_0 > W_M \end{cases} \quad (15)$$

$$P_t = \int I t dt \quad (16)$$

式中: R 为产流量(mm); $f(t)$ 为土壤下渗能力(mm/h); P_t 为 t 时刻降雨量(mm); W_0 为土壤前期含水量(mm); W_M 为土壤最大蓄水容量(mm)。当 $I > f$ 时,发生超渗产流;当 $P_t > W_M - W_0$ 时,发生蓄满产流, W_M 可由上述对梯田最大蓄水容量分布式计算所得。

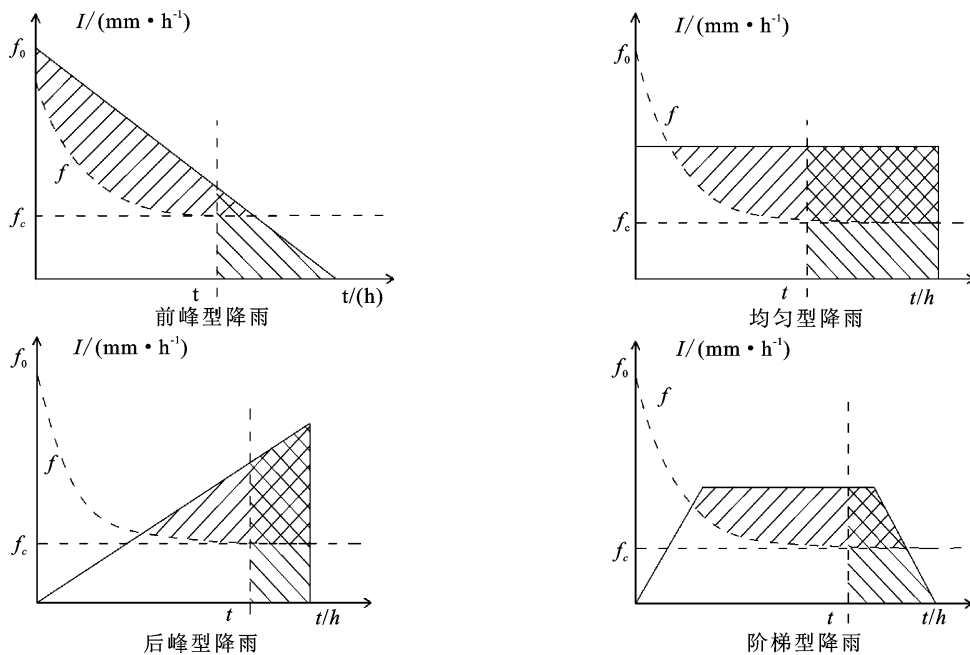


图 3 降雨雨型

Fig. 3 Rainfall pattern

3.1 前峰型降雨

对于前峰型降雨,雨强随时间呈递减趋势,可近似认为 $I = -at + I_0$, 则前峰型降雨发生蓄满产流的临界时间 t 可表示为:

$$P_t = \int (-at + I_0) t dt = W_M - W_0 \quad (17)$$

式中: a 为雨强变化系数($a > 0$),根据实际情况拟定; I_0 为初始降雨强度(mm/h)。

由图 3 可知,降雨初期雨强最大,最易发生超渗

产流。在降雨后期,雨强逐渐减小,表层土壤几乎接近饱和,土壤入渗能力也迅速降低,可能发生超渗产流。在降雨过程中,土壤含水量直线上升,当表层土壤达到蓄满状态后,土壤入渗速率稳定,降雨与地表径流、壤中流基本保持平衡状态。有研究^[27-28]表明,起始阶段降雨强度越大,雨滴溅起更多细小颗粒堵塞孔隙使得土壤表面更容易出现结皮,严重阻碍水分下渗,而且雨强越大,土壤在单位时间单位面积内所容纳的降雨量也越大。所以对前峰型降雨来说,产生蓄满产流或超渗产流的时间会早于其他雨型。但由于降雨后期雨强变小和前期入渗,前峰型降雨产生的总径流量小于后峰型降雨,大于均匀型降雨。

3.2 后峰型降雨

对于后峰型降雨,雨强随时间呈递增趋势,可近似认为 $I = bt$, 则后峰型降雨发生蓄满产流的临界时间 t 可表示为:

$$P_t = \int (bt)tdt = W_M - W_0 \quad (18)$$

式中: b 为雨强变化系数 ($b > 0$), 根据实际情况拟定。

后峰型降雨初期雨强较小,而土壤入渗速率较大,土壤含水量上升速度缓慢,此时入渗速率等于雨强。在降雨后期,雨强逐渐增大,表层土壤入渗能力降低,此时雨强远大于土壤下渗速率,极易发生超渗产流。在降雨过程中,土壤含水量上升,但因为后峰型降雨后期会产生大量的超渗径流,所以降雨后期引起的土壤含水量的增加与前峰型降雨相比,在同样的雨强下偏小。研究^[8,29]表明,峰前降雨量会削弱或抵消土壤的滞蓄作用,因此降雨峰值持续期间土壤入渗速率降低,降雨下渗受阻,所以对后峰型降雨来说,此时土壤蓄水效益更弱,发生蓄满产流或超渗产流会产生更大的径流量,比前峰型降雨多产生约 1/4 的径流。

3.3 均匀型降雨

对于均匀型降雨,雨强不随时间变化,可近似认为 $I = c$, 则后峰型降雨发生蓄满产流的临界时间 t 可表示为:

$$P_t = \int ctdt = W_M - W_0 \quad (19)$$

式中: c 为恒定雨强,根据实际情况拟定。

对于均匀型降雨,因为雨强基本不随降雨历时变化,土壤含水量上升缓慢。在降雨的中后期阶段易发生超渗产流和蓄满产流,产生径流的强度随降雨历时呈现先增加后稳定的趋势,径流强度与土壤入渗速率之间逐渐达到相对平衡状态^[27]。前人^[28,30]研究发现,均匀型降雨产生最小的总径流量、最小的峰值径流量。与均匀型降雨相比,降雨强度变化时,径流率和峰值径流量比均匀型降雨要高出 85%~570%。

3.4 阶梯型降雨

对于阶梯型降雨,雨强随时间先增大、再不变、最后减小,可近似认为:

$$I = \begin{cases} b't & t \leq t_1 \\ c't_1 & t_1 < t \leq t_2 \\ -a't + d & t > t_2 \end{cases} \quad (20)$$

因此,阶梯型降雨发生蓄满产流的临界时间 t 可表示为:

$$P_t = \int [(b't_1)t_1 + c'(t-t_1)]dt = W_M - W_0 \quad t_1 < t \leq t_2 \quad (21)$$

$$P_t = \int \left\{ \begin{aligned} &(b't_1)t_1 + c'(t_2-t_1) \\ &+ [-a'(t-t_2) + d](t-t_2) \end{aligned} \right\} dt = W_M - W_0 \quad t_2 < t \quad (22)$$

式中: b' 、 c' 、 a' 、 d 为雨强变化系数,根据实际情况拟定; t_1 、 t_2 为雨强趋势变化时间点。

对于阶梯型降雨,降雨初期、后期雨强均较小,降雨中期雨强较大。阶梯型降雨结合了后峰型降雨、均匀型降雨、前峰型降雨的特征。降雨初期土壤入渗速率较大,在降雨后期,降雨强度逐渐减小,表层土壤几乎接近饱和,土壤入渗能力也迅速降低,此时雨强略大于土壤下渗速率,可能发生超渗产流。总体来说,阶梯型降雨的径流总量较大,径流峰值较大^[31]。

4 结论

梯田蓄水效益计算方法主要为野外布设径流小区观测径流量,存在投入成本高、无法还原实际梯田土壤状况等问题。利用径流小区量化梯田蓄水效益,在不同区域所得的结果差异较大,针对梯田田块内部差异以及降雨类型可能引起蓄水效益差异的问题,提出梯田蓄水保水效益评估方法。该方法可大幅度降低对野外设施、设备的依赖程度,降低投入成本,借助野外调查采样,考虑梯田土壤性质、梯田形态以及降雨雨型的差异,基于模型模拟计算梯田蓄水效益。此外,该方法可根据单个梯田田块蓄水效益分布式计算数据,在不同区域尺度上估算梯田蓄水保水效益。

5 展望

该方法综合考虑了影响梯田蓄水效益的内部和外部驱动因素,计算单个梯田田块的蓄水效益,适用于不同区域、不同类型的梯田。但在以下两个方面还有待深入研究。

(1) 基于土壤水库模型,计算单个梯田田块蓄水效益时,公式表示为静态的土壤蓄水量。但在实际情况中,受植被覆盖的影响,土壤水分含量往往是动态变化的。因此,梯田土壤水分动态变化特点及与植被耦合后的土壤蓄水量变化,值得进一步地研究和探索。

(2)降雨特征是影响土壤蓄水效益的重要因素,但不同区域降雨特征差异的变化较大,常有极端降雨发生。因此,往后在研究不同降雨雨型下梯田蓄水效益时,应进一步验证在极端降雨频发区域的适用性,以期为梯田蓄水保水效益评估提供更全面、精确的计算方法。

参考文献:

- [1] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 170: 141-149.
- [2] 李太魁, 张香凝, 寇长林, 等. 不同农艺措施对丹江口库区坡耕地茶园水土和磷素流失的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(12): 2324-2330.
- LI T K, ZHANG X N, KOU C L, et al. Effects of different agronomic measures on runoff, water and phosphorous losses of tea garden located in sloping cropland in Danjiangkou Reservoir area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(12): 2324-2330.
- [3] 肖理, 王章文, 殷庆元, 等. 金沙江干热河谷坡改梯对水土保持的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(12): 2856-2861.
- XIAO L, WANG Z W, YIN Q Y, et al. Effect of terracing slope cropland on soil and water conservation in dry-hot valley of Jinsha River Basin, southwest China[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(12): 2856-2861.
- [4] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [5] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1): 34-37.
- WU F Q, ZHANG Y B, WANG J. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 34-37.
- [6] 胡建民, 胡欣, 谢颂华. 南方红壤坡地几种典型治理措施的径流调控效应[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 32-36, 41.
- HU J M, HU X, XIE S H. Effects of several typical measures on regulating runoff in slope land of red soil in southern China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 32-36, 41.
- [7] 魏飒, 郭永晨, 侯克. 北方土石山区坡改梯工程建设技术标准与示范[J]. *中国水土保持*, 2015(4): 28-30.
- WEI S, GUO Y C, HOU K. Technical standard and demonstration of slope-to-ladder project in northern rocky mountain area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(4): 28-30.
- [8] 朱奎, 强思远, 毋小苗, 等. 不同降雨特征对径流过程的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(4): 33-37.
- ZHU K, QIANG S Y, MU X M, et al. Influence of different rainfall characteristics on runoff process[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(4): 33-37.
- [9] 杨国强, 陶虎, 雷少伟, 等. 不同雨型条件下非饱和土边坡渗流及稳定分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(6): 166-170.
- YANG G Q, TAO H, LEI S W, et al. Analysis of seepage and stability of unsaturated soil slopes under different rainfall patterns [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(6): 166-170.
- [10] 张国华, 张展羽, 左长清, 等. 红壤坡地不同类型梯田的水土保持效应[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(2): 77-79, 84.
- ZHANG G H, ZHANG Z Y, ZUO C Q, et al. Water and soil conservation effect for different types of terraces on red soil slope land [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(2): 77-79, 84.
- [11] 项佳敏, 章明奎, 丁志峰, 等. 地形部位对亚热带低丘梯田土壤性状与类型的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(1): 20-27.
- XIANG J M, ZHANG M K, DING Z F, et al. Effects of topographic position on soil properties and types of terraced fields in subtropical low hills [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1): 20-27.
- [12] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 25-32, 122.
- DU R Y, YAO C, LIU Y H, et al. Grid-Xin'anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6): 25-32, 122.
- [13] 袁志明, 卢金锁. 雨水花园侧向防渗措施效果的试验与模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(13): 130-134.
- YUAN Z M, LU J S. Experiment and simulation on anti-seepage effect of lateral impervious protective measures in rain garden [J]. *China Water and Wastewater*, 2018, 34(13): 130-134.
- [14] 任加国, 范坤, 陈清, 等. 田埂在农业面源污染治理中的应用现状与展望[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 262-269.
- REN J G, FAN K, CHEN Q, et al. Application status and prospect of field ridge in agricultural non-point source pollution treatment [J]. *Journal of Environmental*

- Engineering Technology, 2023, 13(1): 262-269.
- [15] 汪三树, 刘德忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的蓄水保土效应[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19): 4091-4100.
- WANG S S, LIU D Z, SHI D M, et al. Analysis on the soil and water conservation benefits of four bunds at edges of sloping land in purple hilly area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(19): 4091-4100.
- [16] 程冬兵, 张平仓, 蔡崇法, 等高绿篱系统土壤水分入渗特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 221-226.
- CHENG D B, ZHANG P C, CAI C F. Study on the soil water infiltration properties in contour hedgerow system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 221-226.
- [17] LIU X Y, XIN L J, LU Y H. National scale assessment of the soil erosion and conservation function of terraces in China[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: e107940.
- [18] WEI W, FENG X R, YANG L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 647: 1323-1332.
- [19] 包耀贤. 黄土高原坝地和梯田土壤质量特征及评价[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- BAO Y X. The characteristics and assessment on soil quality of dam land and terrace in loess plateau[D]. Shanxi, Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [20] 张宇恒, 王忠诚, 王亚楠, 等. 基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 241-247.
- ZHANG Y H, WANG Z C, WANG Y N, et al. Soil quality evaluation with different treatment models in Yimeng mountainous area based on minimum data set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 241-247.
- [21] 陈新军, 阮芬, 廉士增, 等. 沂蒙山区不同水土保持措施下土壤物理性状分析[J]. 中国水土保持, 2014(8): 30-32.
- CHEN X J, RUAN F, LIAN S Z, et al. Analysis of soil physical properties under different soil and water conservation measures in Yimeng Mountain area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(8): 30-32.
- [22] 张靖宇. 红壤丘陵区不同类型梯田水土保持效益研究[D]. 江西: 江西农业大学, 2011.
- ZHANG J Y. Study on soil and water conservation benefit of different terrace types in red soil hilly region[D]. Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [23] 李源, 宋维峰, 马建刚. 哈尼梯田典型区域土壤水分特征曲线模拟研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(2): 90-98.
- LI Y, SONG W F, MA J G. Simulation of soil moisture characteristic curve in the typical region of Hani Terraces[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(2): 90-98.
- [24] 刘澄静, 角媛梅, 高璇, 等. 哈尼梯田水源区不同景观类型土壤水分的入渗特性及影响因子[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 99-105, 111.
- LIU C J, JIAO Y M, GAO X, et al. Soil water infiltration characteristics and its influencing factors in different landscape types in water source area of Hani Terrace[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 99-105, 111.
- [25] 殷水清, 王杨, 谢云, 等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 617-624.
- YIN S Q, WANG Y, XIE Y, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 617-624.
- [26] WANG W T, YIN S Q, XIE Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J]. Catena, 2016, 141: 56-65.
- [27] 黎俊佑, 马岚, 刘京晶, 等. 雨型对华北土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 1-6.
- LI J Y, MA L, LIU J J, et al. Effects of rainfall patterns on slope soil erosion in the rocky mountain area of North China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 1-6.
- [28] DUNKERLEY D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [29] 刘凤丽, 熊玉江, 范乐, 等. 水稻灌区降雨径流特征及其影响因素研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 95-100.
- LIU F L, XIONG Y J, FAN L, et al. Characteristics and influencing factors of rainfall-runoff in rice irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(5): 95-100.
- [30] DUNKERLEY D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(22): 4415-4435.
- [31] ALAVINIA M, SALEH F N, ASADI H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(3): 270-278.