第35卷 第1期
2016年2月

中 国 岩 溶
CARSOLOGICA SINICA

Vol. 35 No. 1
Feb. 2016

左烽林,魏朝富.基于DEM和SCS模型的重庆岩溶槽谷区塘堰复蓄次数的计算[J].中国岩溶,2016,35(1):87-97.
DOI:10.11932/karst20160113

基于DEM和SCS模型的重庆岩溶槽谷区塘堰复蓄次数的计算

左烽林,魏朝富
(西南大学资源环境学院,重庆 400715)

摘 要:文章以重庆市九龙坡区中梁村和云峰村两个典型岩溶槽谷区为研究区,通过利用数字高程模型(DEM)划分集水区,依据径流曲线数模型(SCS)模拟降雨径流,CROPWAT8.0计算作物需水量,对该区塘堰灌溉系统进行水量平衡分析,计算得到了塘堰复蓄次数。结果表明:(1)SCS模型推算出研究区的径流系数范围为0.16~0.27,该模型模拟产流合理可靠;(2)在岩溶槽谷区以集水区为单位进行塘堰工程来水计算较以行政区划为单位更为准确;(3)岩溶槽谷地区在枯水年时塘堰对雨水利用效率最高,弃水率最小为50.98%;(4)当降雨频率分别为P=50%、75%和95%时,重庆岩溶槽谷地区相应的塘堰复蓄次数为2.51、2.60和2.12。

关键词:SCS模型;DEM;集水区;塘堰复蓄次数;重庆岩溶槽谷区

中图分类号:S274 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4810(2016)01-0087-11

0 引 言

随着集雨农业科学研究的发展,雨水利用已经成为农业用水的新水源途径[1],尤其是在我国西南地区,由于降雨的时空分布不均,导致季节性缺水严重,农业水资源供需矛盾突出[2]。岩溶地区农业发展的水土资源条件差,农业生产效率低[3],雨水集蓄工程的发展对缓解区域水资源短缺和提升西南地区农业生产力的水平有着重要意义。我国岩溶区面积3.44×10^6 km^2,约占国土面积的1/3,其中裸露岩溶石山区约0.907×10^6 km^2[4],以西南地区分布面积较大而且集中。岩溶槽谷地区地质环境特殊,地表保水性能差,大量的降雨到达地表后通过岩溶裂隙、漏斗或落水洞等通道流入地下,造成岩溶干旱缺水现象[5]。西南岩溶地区长期强烈的岩溶化作用产生地表地下双层空间结构,导致水源漏失、深埋,形成水土资源不配套的基本格局[6]。故重庆地区迫切发展高效雨水集蓄工程,而蓄水设施规模是缺水地区雨水集蓄利用规划的重要内容[7]。重庆地区的雨水集蓄工程类型主要为塘堰工程。因塘堰工程规模一般较小,一年内可多次蓄满再放空,所以通过塘堰年内实际可用水量与塘堰容量的比值来反映塘堰供水能力,即塘堰复蓄次数[8]。该参数的计算对塘堰供水量的确定,进而对塘堰工程规划具有实际指导意义。

岩溶槽谷地区的塘堰工程规模小,分布广,一般没有实测径流资料。对于无实测径流资料区域的径流计算的常规方法有水文比拟法、参数等值线图法、径流系数法等,水文模型有SCS模型、IHACRES模型以及新安江模型等[9]。其中SCS模型能够客观反映土壤类型、土地利用方式及前期土壤含水量对降雨径流的影响,其显著特点是模型结构简单、所需输入参数少,是一种较好的小型集水区径流计算方法。近年来,SCS模型在水土保持与防洪、城市水文及无资料流域的多种水文问题等诸多方面得到应用,并取得了较好的效果[10]。

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B02)
第一作者简介:左烽林(1991-),女,硕士研究生,主要从事土壤水分与水资源开发利用方面的研究。E-mail:541747690@qq.com。
通讯作者:魏朝富(1962-),男,研究员,博士生导师,主要从事农业资源利用研究。E-mail:weicf@swu.edu.cn。
收稿日期:2015-09-22

万方数据

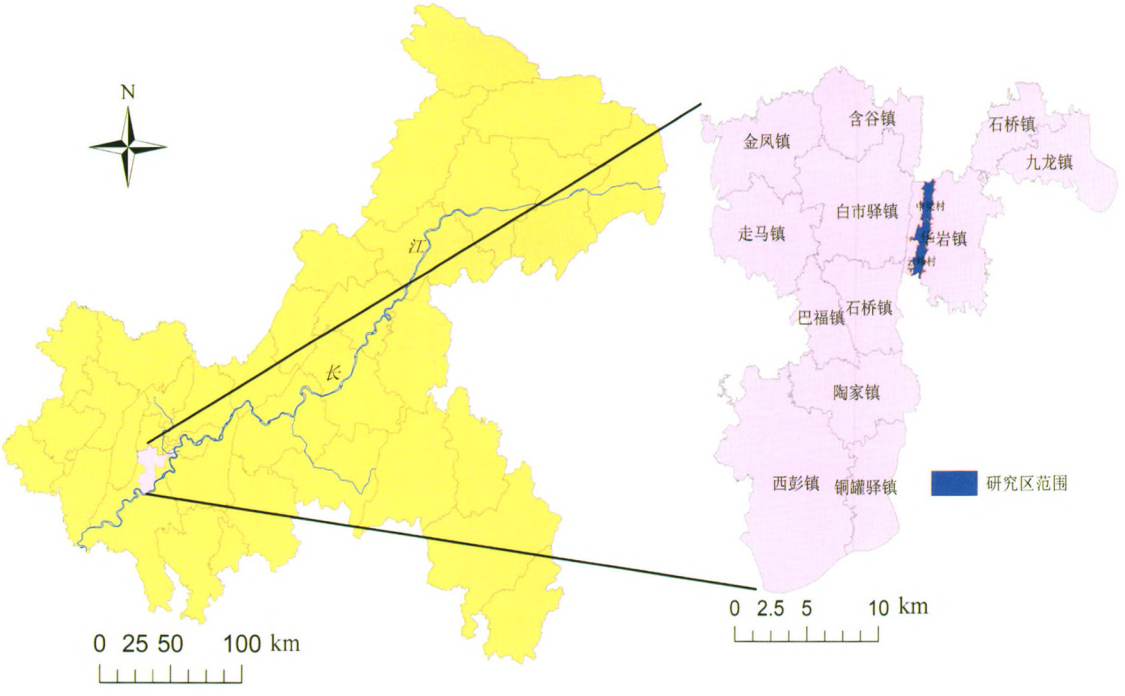

图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

重庆独特的岩溶槽谷地形，由于复杂的岩性组合特点，受区域控制性强，这种地形的塘堰复蓄次数特征究竟如何，目前鲜有研究。蒋尚明等[8]提出了在江淮丘陵区塘堰复蓄系数的确定方法，计算过程合理，其研究地貌为丘陵区，与岩溶槽谷区情况大不相同，但计算思路有所借鉴之处。另外其以乡镇为研究单位，无法保证该单位能够将雨水汇合和集中排出；且作物需水量计算所需数据量大，在实际工程中较难使用。基于此，本文选取重庆中梁村和云峰村为研究区，基于 DEM 和 SCS 模型，以集水区为空间单位，以旬为时间单位，使用 CROPWAT8.0 计算作物需水量对区域内塘堰复蓄次数进行研究，以期为雨水拦蓄工程的建设提供依据。

1 研究区概况

重庆九龙坡区华岩镇位于中梁山山脉中段东侧，研究区涉及中梁村和云峰村两个行政村，面积为 532.3 hm^2。地理位置介于 106°23′49″～106°25′06″E，29°26′20″～29°29′47″N（图 1）。其地貌类型为渝中构造平行岭（低山）谷（丘陵）区，中梁山岩溶槽谷，长条状岩溶负地形。其为典型的背斜低山，海拔在 300～700 m 之间，呈现“一山三岭二槽”的典型岩溶槽谷景观[11]。出露的地层包括三迭系须家河组，雷口坡组，嘉陵江组和飞仙关组。研究区内土壤分布主要以黄色石灰土，暗紫泥土和矿子石泥土为主，主要由嘉陵江组岩层发育而来。研究区气候属亚热带季风性湿润气候，年平均气温 17.3 ℃，降雨量多年平均值为 1 027.3 mm，总雨量较充沛，但降水在时间上分布不均。土地利用类型主要为林地和旱作耕地。研究区水文地质类型为碎屑岩类孔隙裂隙含水岩组，富水程度较弱，地下水渗透为散流型。研究区内无干流、支流水系，灌溉水利设施主体为塘堰。

2 材料与方法

2.1 数据来源

华岩镇勘界数据和等高线地形图（1∶500 重庆独立坐标系）；研究区卫片（西安 80 坐标系）；2013 年重庆市九龙坡区农村产品、产量年报；2013 年九龙坡区农田灌溉水有效利用系数测算分析成果报告；研究区近 51 年（1961－2011 年）旬降雨数据来源于九龙坡区气象观测站。

2.2 研究方法

2.2.1 SCS 模型

SCS 模型是美国农业部土壤保持局（USDA SCS）开发用来估算无资料区径流量的经验模型，它能反映不同土壤类型、不同土地利用方式及前期土壤

万方数据

含水量对降雨径流的影响[12-14]。SCS 模型的数学表达式[15]，经整理后，可用下述公式计算：

$$\begin{cases} Q=\dfrac{(P-\lambda S)^2}{P+(1-\lambda)S} & P\geqslant\lambda S \\ Q=0 & P\leqslant\lambda S \end{cases} \tag{1}$$

式中：Q 为实际径流量；P 为可能径流量和初始滞留损失量之和，也即相应面积上的降雨量；S 为最大可能滞留量，取决于土壤入渗速率和土壤储水容量。在美国的试验农业小流域 λ 一般取 0.2，但由于中国的降雨季节变化大，取值小于 0.2[16]。研究区地质地貌类型为岩溶槽谷，在本研究中 λ 取 0.1[17]。

SCS 模型中用径流曲线数(CN)估计流域土壤的最大可能入渗量 S，是反映降雨前流域特征的一个综合参数，函数关系可表达为：

$$S=\frac{25400}{CN}-254 \tag{2}$$

CN 是一个无量纲参数，与前期土壤湿度(AMC)、土壤类型、土地利用、坡度等因素有关，对径流计算结果影响很大[18]。

在 SCS 产流计算方法中，CN 是唯一未知参数。根据 A、B、C、D 四组水文土壤类型和土地利用方式对 CN 进行确定，采用的参考值[19]如表 1 所示。

表 1　不同土地利用方式和土壤类型的 CN 参考值

Table 1　The CN reference values of different land use patterns and soil types

土地利用方式	土壤类型			
	A	B	C	D
村镇	74	84	90	92
旱地	69	79	85	89
水田	77	88	91	93
园地	66	75	83	89
林地	36	60	73	79

2.2.2　数字高程模型

本研究以 300 m×300 m 分辨率的数字高程模型为基础(图 2)，利用 GIS 等软件自动提取水系和集水区和各个属性数据[20]，进而继续后面的分析研究，使数据得到图形化。

由 ArcGIS 中的水文分析模块得到研究区的集水区分布图，集水区总面积为 532.3 hm^2，涉及塘堰共 79 个，总容积 $13.18\times10^4\ m^3$。在水系分布合理的前提下，对其中小且碎的集水区进行耦合[21]，将集水区变为 6 个(图 3)。

图 2　研究区数字高程模型(DEM)

Fig. 2　Digital elevation model (DEM) of the study area

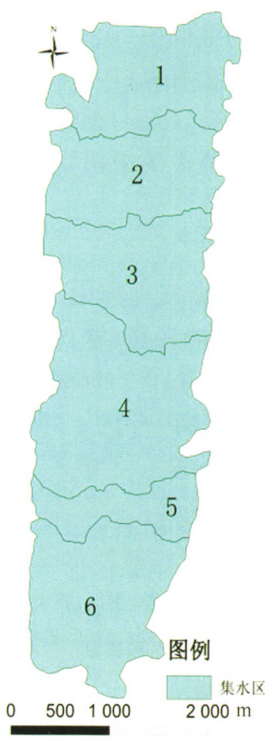

图 3　研究区集水区分布图

Fig. 3　Distribution of catchments in study area

2.2.3　作物灌溉需水量

作物各阶段的需水量 ET_c 可由下式计算：

万方数据

$$ET_{ci}=ET_{0i}\times K_{ci} \quad (3)$$

式中，i 为作物的生长阶段；ET_{0i} 为第 i 生长阶段的参照作物蒸腾量；K_{ci} 为第 i 生长阶段的作物系数。利用彭曼－蒙特斯方法计算参考作物需水量 ET_0，计算公式为[22]：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_a-e_d)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (4)$$

式中，ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量，mm/d；Δ 为饱和水汽压与空气温度关系曲线的斜率，kPa/℃；R_n 为净辐射量，MJ/(m^2·d)；G 为土壤热通量，MJ/(m^2·d)；γ 为湿度计常数，kPa/℃；T 为空气平均温度，℃；U_2 为地面以上 2 m 高处的风速，m/s；e_a 为空气饱和水汽压，kPa；e_d 为空气实际水汽压，kPa。本研究参考联合国粮农组织(FAO)推荐的标准作物系数和修正公式并结合当地实际来确定研究区种植作物的生育时期及其作物系数。

由于研究区内没有完整的地表径流观测资料，在生产实践中常采用有效系数法计算有效降雨量，即：

$$P_e=\sigma P \quad (5)$$

式中，σ 为降雨有效利用系数，其值与降雨总量、降雨强度、降雨延续时间、土壤性质、作物生长、地面覆盖和计划湿润层深度等因素有关；P 为旬降雨量，mm。本文参照联合国粮农组织(FAO)推荐的研究区附近站点的 σ 值和重庆市研究成果来确定作物的降雨有效利用系数。

2.2.4 水量平衡

水量平衡是指在水循环过程中，对于任一地区(或任一水体)，在给定的时段内，输入输出的水量之差额必等于蓄水量的变化量[23]。塘堰灌溉系统也符合水量平衡的原理，数量关系为：

$$V_i=V_{i-1}+W_{来}-W_{用}-W_{损}-W_{弃} \quad (6)$$

式中，V_i 为塘堰灌溉系统第 i 时段的塘堰蓄水量；$W_{来}$ 为塘堰灌溉系统第 i 时段的来水量；$W_{用}$ 为塘堰灌溉系统第 i 时段的灌溉水量；$W_{损}$ 为塘堰灌溉系统第 i 时段的损失量；$W_{弃}$ 为塘堰灌溉系统第 i 时段的弃水量。以上单位都为 10^4 m^3。

$$W_{用}=\frac{W_{净}}{\eta} \quad (7)$$

式中，$W_{净}$ 为塘堰系统净灌溉用水量，10^4 m^3；η 为塘堰系统的灌溉水有效利用系数，根据重庆九龙坡区农林部门 2013 年测算数据结果，该值取 0.7。

另外 $W_{损}$ 包括水面蒸发量 $W_{蒸}$ 和渗透损失量 $W_{渗}$。使用经验系数法估算渗漏损失，按中等水文地质条件的系数，即月渗透量与塘堰蓄水量之比为 1.5%进行计算。水面蒸发量由以下模型[24]计算：

$$E=[0.1+0.24(1-U^2)^{0.5}](e_0-e_{150})W^{[0.85W/(W+2)]} \quad (8)$$

式中：E 为水面蒸发量，mm/d；U 为相对湿度，以小数计；e_0 为水面水汽压，hPa；e_{150} 为水面以上 150 cm 处空气中的水汽压，hPa；W 为水面以上 150 cm 处的风速，m/s。

2.2.5 塘堰复蓄次数

塘堰复蓄次数是指塘堰年内实际可用水量与塘堰容量的比值，反映了塘堰供水能力，也是塘堰供水量估算的重要特征值。具体计算公式[8]为：

$$N=\frac{V_{末}-V_{初}+\Sigma W_{用}}{V_0} \quad (9)$$

式中：N 为塘堰复蓄次数；$V_{末}$ 为塘堰年末蓄水量；$V_{初}$ 为塘堰年初蓄水量；V_0 为塘堰蓄水容量。

3 结果与分析

3.1 塘堰工程来水量计算

3.1.1 SCS 模型参数的确定

研究区内土壤分布主要以黄色石灰土，暗紫泥土和矿子石泥土为主，主要由嘉陵江组岩层发育而来，属于土壤水文分组中的 B 组，以此计算各集水区的 CN 值。参考 SCS 曲线计算方法[25]提供的取值条件给定不同土地利用方式各土壤类型的 CN 值，采用的参考值如表 1 所示，各个集水区的 CN 值按面积权重比自动计算[19]。计算第 1 到第 6 个集水区土壤水文分组 B 组的 CN 值分别为 71.25，70.81，68.60，66.60，64.92，65.17。

3.1.2 产流模拟

研究区两个村都位于九龙坡区，本研究选取重庆九龙坡气象观测站作为水文代表站点。通过对该站点 1961－2011 年的降雨资料进行频率分析，年降雨均值是 1 027.24 mm，$C_v=0.17$，$C_s=1.54C_v$，P＝50%、P＝75%和 P＝95%的降雨量分别为 1 013.2 mm、875.1 mm 和 760 mm。P＝50%、P＝75%和 P＝95%对应的典型年分别为 1979 年、2000 年和 1993 年。研究采用重庆市九龙坡区 1979 年、2000 年和 1993 年的旬降雨数据进行分析，从而进行产流模拟[26]。结合上述 SCS 模型的参数值，则可计算研究区各集水区逐旬平均产流量，结果见表 2。

万方数据

表 2　研究区各集水区不同降雨频率年逐旬平均产流模拟结果/mm

Table 2　Different rain frequency year runoff of ten days simulation results of each catchment in study area/mm

月份	旬	P=50%						P=75%						P=95%					
		集水区编号																	
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1	1.19	1.13	0.84	0.62	0.46	0.48	0.88	0.91	1.03	1.16	1.26	1.25	0.06	0.07	0.13	0.20	0.27	0.26
	2	0.15	0.17	0.25	0.33	0.41	0.40	0.30	0.32	0.42	0.52	0.61	0.60	1.23	1.16	0.87	0.64	0.48	0.50
	3	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51	0.15	0.16	0.24	0.33	0.41	0.39	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51
2	1	4.04	3.90	3.24	2.71	2.31	2.37	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51
	2	0.05	0.04	0.01	0.00	0.01	0.01	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	2.22	2.13	1.69	1.34	1.09	1.12
	3	0.93	0.95	1.08	1.20	1.31	1.30	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51
3	1	1.80	1.72	1.34	1.04	0.82	0.85	0.05	0.06	0.11	0.18	0.25	0.24	0.01	0.01	0.05	0.09	0.15	0.14
	2	0.00	0.00	0.01	0.05	0.09	0.08	1.12	1.14	1.27	1.40	1.51	1.49	5.96	5.78	4.92	4.22	3.68	3.76
	3	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51	3.90	3.76	3.12	2.60	2.21	2.27	0.13	0.11	0.05	0.01	0.00	0.00
4	1	0.03	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	5.19	5.02	4.24	3.60	3.12	3.19	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01	0.00
	2	0.72	0.74	0.86	0.98	1.09	1.07	2.58	2.48	1.99	1.61	1.32	1.36	15.78	15.43	13.78	12.38	11.29	11.44
	3	5.81	5.63	4.79	4.10	3.57	3.65	2.76	2.65	2.14	1.74	1.44	1.48	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.07
5	1	0.50	0.47	0.30	0.19	0.11	0.12	2.54	2.43	1.95	1.57	1.29	1.33	0.62	0.58	0.39	0.26	0.17	0.18
	2	3.03	2.91	2.37	1.94	1.62	1.66	0.02	0.02	0.00	0.01	0.03	0.02	8.89	8.64	7.52	6.59	5.87	5.97
	3	6.40	6.20	5.31	4.57	4.00	4.08	0.49	0.45	0.29	0.18	0.11	0.11	15.25	14.91	13.29	11.93	10.86	11.01
6	1	63.99	63.17	59.21	55.71	52.85	53.26	2.13	2.04	1.61	1.28	1.03	1.07	0.06	0.07	0.14	0.21	0.28	0.26
	2	0.99	1.01	1.14	1.26	1.37	1.35	26.74	26.25	23.91	21.91	20.31	20.54	11.50	11.22	9.88	8.76	7.89	8.02
	3	12.44	12.14	10.73	9.55	8.62	8.76	2.82	2.70	2.19	1.78	1.48	1.52	0.75	0.70	0.48	0.33	0.22	0.24
7	1	39.65	39.02	36.03	33.44	31.34	31.65	62.40	61.59	57.68	54.23	51.42	51.83	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51
	2	5.60	5.43	4.60	3.93	3.42	3.50	0.72	0.67	0.47	0.31	0.21	0.22	0.04	0.05	0.11	0.17	0.23	0.22
	3	1.03	1.05	1.18	1.30	1.41	1.39	0.15	0.16	0.25	0.33	0.41	0.40	37.12	36.52	33.65	31.16	29.16	29.45
8	1	0.35	0.37	0.47	0.57	0.67	0.66	28.05	27.54	25.14	23.07	21.42	21.65	38.76	38.15	35.20	32.64	30.58	30.88
	2	22.33	21.89	19.81	18.04	16.63	16.84	0.46	0.43	0.27	0.16	0.09	0.10	1.14	1.16	1.29	1.42	1.52	1.51
	3	51.29	50.57	47.08	44.02	41.54	41.90	11.66	11.37	10.02	8.89	8.01	8.14	0.46	0.48	0.59	0.70	0.80	0.79
9	1	34.11	33.54	30.81	28.46	26.57	26.84	4.71	4.55	3.82	3.23	2.78	2.85	5.13	4.97	4.19	3.56	3.08	3.15
	2	3.50	3.37	2.77	2.29	1.93	1.98	0.28	0.30	0.40	0.50	0.59	0.58	0.42	0.38	0.24	0.14	0.08	0.08
	3	0.31	0.28	0.16	0.08	0.04	0.04	13.91	13.58	12.06	10.79	9.79	9.93	0.02	0.03	0.07	0.13	0.18	0.17
10	1	1.05	0.99	0.72	0.52	0.38	0.40	0.00	0.01	0.03	0.07	0.12	0.11	11.37	11.08	9.76	8.65	7.78	7.91
	2	1.61	1.53	1.18	0.90	0.71	0.73	4.30	4.15	3.46	2.91	2.49	2.55	0.05	0.06	0.11	0.18	0.24	0.23
	3	2.82	2.70	2.19	1.78	1.48	1.52	2.95	2.84	2.30	1.88	1.57	1.61	0.07	0.08	0.14	0.21	0.28	0.27
11	1	0.01	0.00	0.00	0.02	0.05	0.05	0.99	1.01	1.14	1.26	1.37	1.35	0.39	0.36	0.22	0.12	0.07	0.07
	2	0.04	0.05	0.10	0.16	0.22	0.21	0.84	0.79	0.56	0.39	0.27	0.29	0.55	0.57	0.69	0.80	0.91	0.89
	3	0.44	0.46	0.57	0.68	0.78	0.76	0.00	0.00	0.02	0.06	0.10	0.09	0.74	0.76	0.89	1.01	1.11	1.10
12	1	1.11	1.05	0.77	0.56	0.42	0.44	0.96	0.99	1.12	1.24	1.35	1.33	0.08	0.10	0.16	0.24	0.31	0.30
	2	0.82	0.84	0.97	1.09	1.20	1.18	1.22	1.15	0.86	0.63	0.47	0.50	1.02	1.05	1.18	1.30	1.41	1.39
	3	0.28	0.30	0.40	0.50	0.59	0.57	0.26	0.28	0.38	0.48	0.57	0.55	0.77	0.80	0.92	1.04	1.15	1.13
合计		270.69	265.96	243.86	225.44	211.10	213.14	187.88	184.17	167.08	153.12	142.46	143.96	165.23	162.11	147.76	136.13	127.32	128.56

万方数据

3.2 作物灌溉需水量的计算

本文利用 CROPWAT8.0 软件和 CLIMWAT 2.0 for CROPWAT 数据库对作物需水量进行计算。在 CLIMWAT 2.0 for CROPWAT 数据库中选择 CHINA——151 号 CHONGQING 数据导入 CROPWAT8.0 中，将 Climate，Rain，Crop，Soil 等数据输入和选择好后使用 CWR 功能计算不同降雨频率年的作物需水量、有效降雨量和作物灌溉需水量，如表 3 所示(由于篇幅原因具体结果只列 P=50%)。

表 3 研究区 P=50%时农作物逐旬需水量 ETc 计算结果/mm

Table 3 The crops water requirement ETc of ten days calculated results of the study area at P=50% /mm

玉米					豆类					蔬菜(秋冬)					蔬菜(春夏)				
月份	旬	ETc	Pe	Irr. Req.	月份	旬	ETc	Pe	Irr. Req.	月份	旬	ETc	Pe	Irr. Req.	月份	旬	ETc	Pe	Irr. Req.
4	2	5.0	31.9	0.0	9	1	1.8	25.8	0.0	11	2	5.9	2.9	3.0	3	1	1.2	8.8	0.0
4	3	8.4	10.0	0.0	9	2	15.5	14.5	1.0	11	3	9.1	1.8	7.3	3	2	13.6	27.5	0.0
5	1	9.9	15.8	0.0	9	3	13.6	8.4	5.2	12	1	8.4	7.0	1.4	3	3	17.2	13.3	3.9
5	2	16.3	32.5	0.0											4	1	19.3	6.9	12.4
5	3	27.0	31.4	0.0	10	1	13.9	27.3	0.0	12	2	8.5	0.5	8.0	4	2	24.2	31.9	0.0
6	1	33.3	7.3	26.0	10	2	14.5	7.7	6.8	12	3	10.3	1.6	8.7	4	3	27.3	10.0	17.3
6	2	37.2	27.4	9.8	10	3	17.6	7.3	10.3	1	1	10.0	7.4	2.6	5	1	28.4	15.8	12.6
6	3	40.4	16.5	23.9															
7	1	43.7	0.0	43.7	11	1	15.2	14.3	0.9	1	2	9.9	18.8	0.0	5	2	28.8	32.5	0.0
7	2	46.6	7.8	38.8	11	2	13.6	2.9	10.7	1	3	12.0	0.0	12.0	5	3	33.3	31.4	1.9
7	3	43.2	50.3	0.0	11	3	12.4	1.8	10.6	2	1	11.5	0.0	11.5	6	1	30.1	7.3	22.8
8	1	29.3	51.6	0.0															
8	2	14.1	0.0	14.1	12	1	8.1	7.0	1.1	2	2	8.2	22.5	0.0	6	2	6.0	27.4	0.0
小计		354.4	282.6	156.3	小计		126.2	116.9	46.8	小计		93.8	62.5	54.5	小计		229.4	212.9	70.9

注：ETc、Pe、Irr. Req. 分别代表作物需水量、有效降雨量和作物灌溉需水量。

研究区被分为 6 个集水区，其中 4 号集水区面积最大，5 号最小(表 4)。

表 4 研究区各集水区塘堰灌溉系统概况

Table 4 Each catchment pond irrigation system overview of the study area

集水区编号	集水区面积 /hm^2	塘堰容积 /$10^4 m^3$	耕地面积 /hm^2	耕地率
1	86.77	0.75	12.76	0.15
2	79.33	4.56	23.85	0.30
3	89.38	3.43	12.27	0.14
4	134.20	1.89	21.36	0.16
5	37.15	0.68	4.22	0.11
6	105.47	1.87	17.53	0.17
合计	532.30	13.18	91.99	

研究区种植的农作物品种较为单一，主要为旱作作物，如玉米，豆类和蔬菜。其中玉米和豆类种植面积较大，蔬菜种植面积较小。根据当地提供资料情况，研究区旱地复种率偏低，为 134.50%(表 5)。

表 5 研究区各集水区农作物种植面积/hm^2

Table 5 Each catchment crop acreage of the study area/hm^2

集水区编号	总种植面积	玉米	豆类	蔬菜(秋冬)	蔬菜(春夏)
1	17.16	8.58	5.15	2.57	0.86
2	32.08	16.04	9.62	4.81	1.60
3	16.50	8.25	4.95	2.48	0.83
4	28.73	14.36	8.62	4.31	1.44
5	5.68	2.84	1.70	0.85	0.28
6	23.58	11.79	7.07	3.54	1.18
合计	123.73	61.86	37.12	18.56	6.19

3.3 塘堰灌溉系统水量平衡分析

本计算模型以旬为时段单位对塘堰水量进行兴

万方数据

利调节，主要有以下三个计算过程：

(1)当 $V_{i-1}+W_{来}-W_{需}\geqslant V_0$ 时(V_0 为塘堰的蓄水总容量，$W_{需}$ 为灌溉需水量)，即来水量把塘堰系统蓄满后，多余的水量就被塘堰排泄，成为弃水。

(2)当 $0\leqslant V_{i-1}+W_{来}-W_{需}\leqslant V_0$ 时，塘堰系统正常灌溉，没有弃水产生，$V_i=V_{i-1}+W_{来}-W_{用}-W_{损}$。

(3)当 $V_{i-1}+W_{来}-W_{需}-W_{损}<0$ 时，塘堰系统供水无法满足作物灌溉需求，塘堰蓄水全部用来灌溉，$V_i=0$，存在缺水量 $W_{缺}=W_{用}-V_i-W_{来}+W_{损}$，实际的灌水量为 $W_{用}=W_{需}-W_{缺}$。

对塘堰系统进行调节计算时，取塘堰的初始蓄水量 $V_{初}=0.3V_0$，调节计算情况如图 4 所示(由于篇幅原因，具体数据计算表 6 只列出 1 号集水区)。

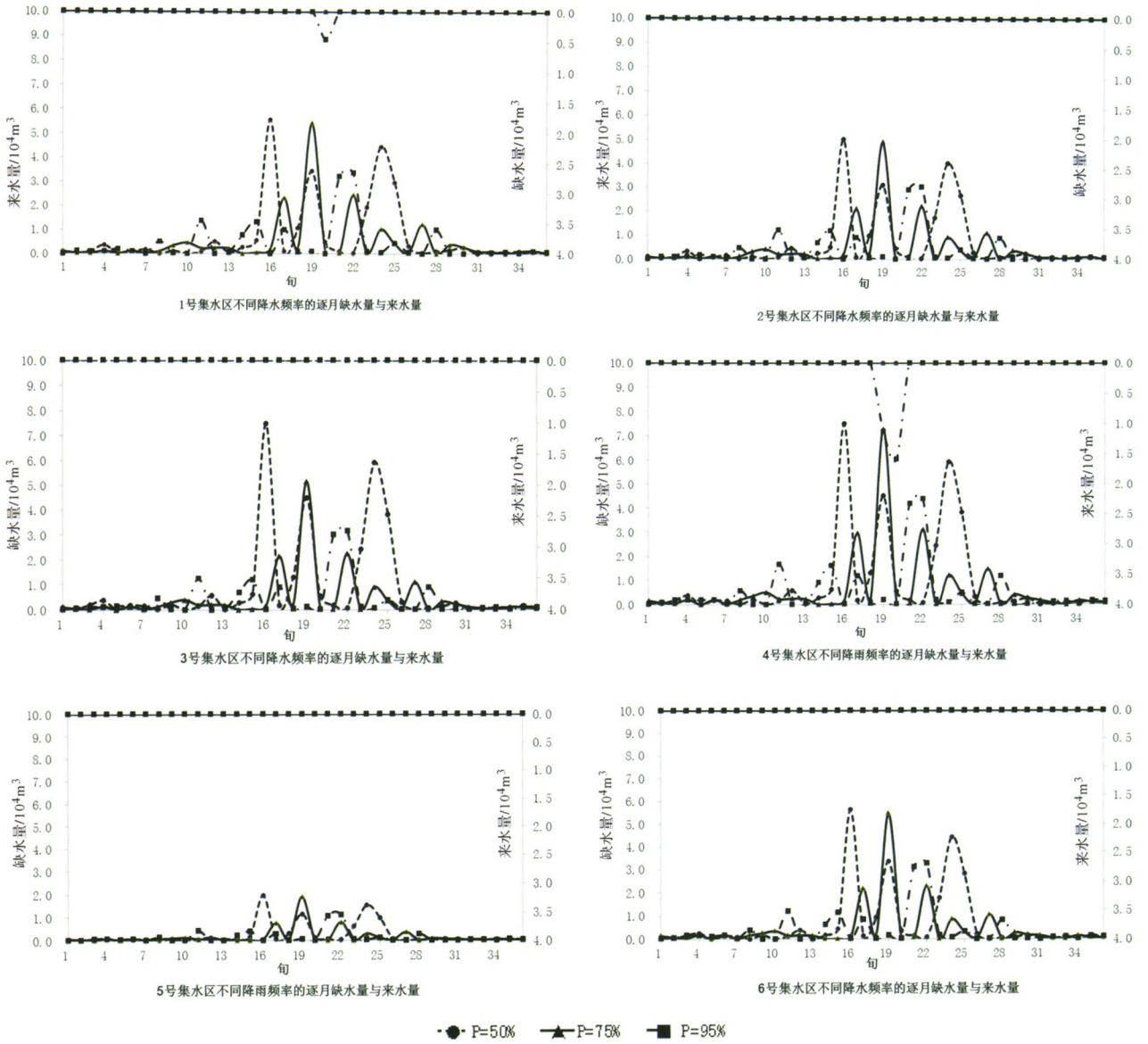

图 4　研究区各集水区不同降水频率的逐旬缺水量与来水量

Fig. 4　The water shortage and water supply of each ten days of a month on different rainfall frequency in catchments of the study area

由表 6 可知，1 号集水区在 P=50%的降雨频率下，3－10 月产生弃水 $19.8\times10^4\,m^3$；在 P=75%时，4－11 月产生弃水 $12.54\times10^4\,m^3$；在 P=95%时，3－10 月产生弃水 $11.25\times10^4\,m^3$，7 月中旬缺水 $0.46\times10^4\,m^3$。弃水量随降雨频率的提高而减少且弃水量较大，主要集中在 6 月上旬和 7、8 月的上下旬。由此说明 1 号集水区塘堰雨水资源的利用潜力很大，应新建塘堰并对原塘堰进行清淤扩容，增大塘堰容量后可扩大玉米种植面积。2 号集水区在 P=50%时，6－9 月弃水量为 $9.7\times10^4\,m^3$；在 P=75%时，7－9 月产生

万方数据

弃水 $2.78\times10^4m^3$；在 P=95%时，8 月和 10 月上旬共产生弃水 $1.59\times10^4m^3$。该区弃水量较少，无缺水情况出现，只需对原有塘堰清淤扩容即可，提高已有塘堰的利用效率。3 号集水区在 P=50%时，6－9月弃水量为 $14.01\times10^4m^3$；在 P=75%时，7－9 月产生弃水 $6.79\times10^4m^3$；在 P=95%时，5－10 月共产生弃水 $5.51\times10^4m^3$。该区弃水集中在 7 月下旬和 8 月上旬，对雨水调节能力较差。该区应适当增大塘堰容积，提高对不均匀降水的调节能力。4 号集水区在 P=50%时，5－9 月产生弃水 $20.12\times10^4m^3$；当 P=75%时，4－11 月产生弃水 $1.68\times10^4m^3$；当 P=95%时，弃水月为 4－10 月，弃水量为 $11.02\times10^4m^3$，7 月上中旬分别缺水 1.13 和 $1.59\times10^4m^3$。由此说明该区塘堰容积偏小，蓄水能力较低，该区应新建塘堰，提高蓄水能力。弃水量集中在玉米种植期的 6、7、8 月的上旬，可适当增大玉米的种植比例，降低泄水量，提高雨水利用效率。5 号集水区当 P=50%时，6－9 月产生弃水 $5.75\times10^4m^3$；当 P=75%时，6－11 月产生弃水 $3.15\times10^4m^3$；当 P=95%时，4－10 月弃水量为 $2.64\times10^4m^3$。该区来水量随降雨频率变化波动较小，在各区中平均弃水量最小，灌溉系统现状情况较好，没有发生缺水，需对原有塘堰设施进行清淤整修。6 号集水区在 P=50%时，6、8、9 月产生弃水 $16.17\times10^4m^3$；当 P=75%时，6－11 月产生弃水 $8.71\times10^4m^3$；当 P=95%时，弃水月为 4－10 月，弃水量为 $7.23\times10^4m^3$。该区应新建塘堰和对已有塘堰进行清淤扩容，可适当增加玉米、豆类种植，利用丰水期弃水量，提高塘堰蓄水有效性，使该区的灌溉效率达到最佳。

根据计算结果可知：由于研究区耕地率低，且所种植的都为旱作作物，作物需水量少，故研究区缺水情况出现次数较少。弃水月份集中在下半年，年初均未有弃水产生。在 P=50%的降雨频率下，弃水情况主要发生在 6－9 月，8 月弃水量最大，弃水率为 45.98%～84.30%，均值为 81.36%；当 P=75%时，弃水月份为 7－11 月，7 月弃水量最大，弃水率为 19.01%～76.92%，均值为 51.05%；当 P=95%时，弃水月份集中在 4－10 月，8 月弃水量最大，弃水率为 12.35%～78.47%，均值为 50.98%。出现这种现象的原因是重庆地区雨水分期明显，降雨集中在 6－9 月，年末年初降雨量本就偏小，同时研究区秋冬季蔬菜在年初年末需水量大，所以年末年初弃水量较小。这也说明研究区塘堰容量太小，应新增塘堰，对已有塘堰进行清淤扩容，增加作物的种植面积，提高研究区降水利用效率，发挥最大的灌溉潜力。

表 6 研究区 1 号集水区塘堰系统调节过程

Table 6 Regulating calculation results of the pond system in catchment 1

月份	旬	P=50%/10^4m^3							P=75%/10^4m^3							P=95%/10^4m^3						
		$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$	$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$	$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$
					0.22							0.22							0.22			
	1	0.10	0.30	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.08	0.27	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.20	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
1	2	0.01	0.29	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.27	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.29	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	3	0.10	0.32	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01	0.22	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.10	0.36	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
	1	0.35	0.61	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.10	0.26	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.10	0.42	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
2	2	0.00	0.59	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.19	0.58	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
	3	0.08	0.65	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.10	0.32	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.10	0.66	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	1	0.16	0.75	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.30	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
3	2	0.00	0.72	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.10	0.38	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.52	0.75	0.00	0.02	0.00	0.39	0.00
	3	0.10	0.75	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.34	0.69	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.73	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.71	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.45	0.75	0.02	0.02	0.00	0.36	0.02	0.01	0.70	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
4	2	0.06	0.75	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.22	0.75	0.00	0.02	0.00	0.20	0.00	1.37	0.75	0.00	0.02	0.00	1.30	0.00
	3	0.50	0.75	0.02	0.02	0.00	0.46	0.02	0.24	0.75	0.02	0.02	0.00	0.20	0.02	0.00	0.70	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
	1	0.04	0.75	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.22	0.75	0.02	0.02	0.00	0.18	0.02	0.05	0.72	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
5	2	0.26	0.75	0.00	0.02	0.00	0.24	0.00	0.00	0.73	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.77	0.75	0.00	0.02	0.00	0.72	0.00
	3	0.56	0.75	0.00	0.02	0.00	0.53	0.00	0.04	0.74	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	1.32	0.75	0.00	0.02	0.00	1.30	0.00

万方数据

续表 6

月份	旬	P=50%/10^4m^3							P=75%/10^4m^3							P=95%/10^4m^3						
		$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$	$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$	$W_{来}$	$W_{需}$	V_i	$W_{损}$	$W_{缺}$	$W_{弃}$	$W_{用}$
					0.22							0.22							0.22			
	1	5.55	0.75	0.35	0.02	0.00	5.18	0.35	0.19	0.56	0.35	0.02	0.00	0.00	0.35	0.01	0.38	0.35	0.02	0.00	0.00	0.35
6	2	0.09	0.69	0.12	0.02	0.00	0.00	0.12	2.32	0.75	0.12	0.02	0.00	1.99	0.12	1.00	0.75	0.12	0.02	0.00	0.50	0.12
	3	1.08	0.75	0.29	0.02	0.00	0.71	0.29	0.24	0.68	0.29	0.02	0.00	0.00	0.29	0.06	0.50	0.29	0.02	0.00	0.00	0.29
	1	3.44	0.75	0.54	0.02	0.00	2.88	0.54	5.41	0.75	0.53	0.02	0.00	4.79	0.53	0.10	0.04	0.53	0.02	0.00	0.00	0.53
7	2	0.49	0.73	0.48	0.02	0.00	0.00	0.48	0.06	0.31	0.48	0.02	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.48	0.02	0.46	0.00	0.02
	3	0.09	0.75	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.01	0.30	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	3.22	0.75	0.00	0.02	0.00	2.45	0.00
	1	0.03	0.75	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	2.43	0.75	0.00	0.02	0.00	1.96	0.00	3.36	0.75	0.00	0.02	0.00	3.34	0.00
8	2	1.94	0.75	0.17	0.02	0.00	1.74	0.17	0.04	0.59	0.17	0.02	0.00	0.00	0.17	0.10	0.65	0.17	0.02	0.00	0.00	0.17
	3	4.45	0.75	0.00	0.02	0.00	4.43	0.00	1.01	0.75	0.00	0.02	0.00	0.83	0.00	0.04	0.66	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
	1	2.96	0.75	0.00	0.02	0.00	2.94	0.00	0.41	0.75	0.00	0.02	0.00	0.39	0.00	0.45	0.75	0.00	0.02	0.00	0.34	0.00
9	2	0.30	0.75	0.01	0.02	0.00	0.27	0.01	0.02	0.74	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.75	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
	3	0.03	0.71	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	1.21	0.75	0.04	0.02	0.00	1.14	0.04	0.00	0.69	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04
	1	0.09	0.75	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.73	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.99	0.75	0.00	0.02	0.00	0.91	0.00
10	2	0.14	0.75	0.05	0.02	0.00	0.07	0.05	0.37	0.75	0.05	0.02	0.00	0.28	0.05	0.00	0.68	0.05	0.02	0.00	0.00	0.05
	3	0.24	0.75	0.08	0.02	0.00	0.15	0.08	0.26	0.75	0.08	0.02	0.00	0.16	0.08	0.01	0.59	0.08	0.02	0.00	0.00	0.08
	1	0.00	0.72	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.09	0.75	0.01	0.02	0.00	0.06	0.01	0.03	0.59	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
11	2	0.00	0.61	0.09	0.02	0.00	0.00	0.09	0.07	0.71	0.09	0.02	0.00	0.00	0.09	0.05	0.53	0.09	0.02	0.00	0.00	0.09
	3	0.04	0.52	0.10	0.02	0.00	0.00	0.10	0.00	0.58	0.10	0.02	0.00	0.00	0.10	0.06	0.47	0.10	0.02	0.00	0.00	0.10
	1	0.10	0.59	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.08	0.63	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.44	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
12	2	0.07	0.61	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.11	0.69	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.09	0.48	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03
	3	0.02	0.58	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02	0.66	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.07	0.50	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03
合计		23.49	/	2.55	0.78	0.00	19.80	2.55	16.30	/	2.54	0.78	0.00	12.54	2.54	14.34	/	2.49	0.78	0.46	11.25	2.03

3.4 塘堰灌溉系统复蓄次数计算

通过对研究区各集水区进行水量平衡分析得到塘堰系统调节灌溉过程，根据公式(9)可计算研究区各集水区塘堰复蓄次数，计算结果如表 7 所示。

表 7　研究区各集水区不同降水频率下的塘堰复蓄次数

Table 7　Each catchment pond re-storage times of the study area in different rainfall frequency

集水区编号	降水频率		
	P=50%	P=75%	P=95%
1	3.90	4.00	3.09
2	1.43	1.52	1.40
3	1.19	1.30	1.17
4	4.47	4.48	2.96
5	1.80	1.88	1.80
6	2.30	2.39	2.32

取 6 个集水区的平均值为研究区的综合复蓄次数[27]，分别为 P=50%时，N=2.51；P=75%时，N=2.6；P=95%时，N=2.12。根据计算结果可知，研究区降水频率为 75%和 95%时符合塘堰复蓄次数随降雨频率的增大而减小的规律，但 P=50%时结果偏小。经分析，这是由于该典型年平均月降雨量较高，但各月降雨量之差与其他典型年相比差别较大。因此在用水量较大时期降水量少，而用水量小的时期降水量大，二者配比不对应。当不同降水频率的塘堰复蓄次数结果确定后，再综合塘堰工程的规模可合理计算塘堰灌溉系统不同降水频率下的供水总量。

4　结论与讨论

本文以重庆九龙坡区中梁村和云峰村为研究区，利用 DEM 划分集水区，以集水区为空间单位，以旬为时间单位进行分析计算；依据 SCS 模型模拟降雨

万方数据

径流，并使用 CROPWAT8.0 计算作物需水量，从而对塘堰灌溉系统进行水量平衡分析，最终得到重庆岩溶槽谷地区的塘堰复蓄次数。研究表明：

(1)本文使用 SCS 模型模拟产流是合理可靠的。SCS 模型构建了研究区的降雨径流模型，有效解决了缺乏实测水文资料地区的水文模拟问题。SCS 模型已在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[28]、岩溶地区径流模拟中的应用[29]和在四川盆地丘陵区局地径流的研究[26]等多个地区都取得了良好的效果。本文利用研究区各集水区年径流模拟结果和年实际降雨量推算出各个集水区的径流系数范围为 0.16～0.27，而重庆地区的平均径流系数为 0.54[30]，重庆平均径流系数是研究区的 2～3.4 倍。经分析，这是由于研究区岩溶地貌的渗透情况强于丘陵地貌，所以计算的径流系数小于重庆平均范围的结果符合理论情况，与预期一致。

(2)在重庆岩溶槽谷区以集水区为单元进行塘堰工程来水计算较以行政区划(村界、社界等)为单位要更为准确。行政区划主要依据政治、经济和民族等原则，不具备自然科学的研究条件，而集水区是雨水汇合与集中排出的一个地形单位。罗志远等[31]的研究以长江流域多个水库为单位，郑祖金等[32]在塘堰拦蓄地表径流能力的研究中以灌区为单位，本文以集水区为空间单位与以上二者研究思路一致，皆以独立的水流区域为单位。本文通过 DEM 将研究区分划成 6 个小型有效集水区，使研究对象的径流数据空间分布定量化，这使对研究区进行塘堰灌溉系统的水量平衡分析更加具体、合理[21]。把塘堰灌溉系统的供需水情况细化到时间上和空间上，这样能够更加准确全面地进一步计算出塘堰灌溉系统的蓄水量。

(3)岩溶槽谷地区在枯水年时塘堰对雨水利用效率最高。研究区在降雨频率为 95%时弃水率最小，为 50.98%，P=50%时弃水率最大，为 81.36%。蒋尚民等[8]在江淮丘陵地区的研究结果中只有降雨频率为 50%时有弃水产生，与本次的研究结果不相吻合。这是由于枯水年的降雨时段和水量与作物在不同时段需水量相配适宜。丰水年虽降雨量大，但由于岩溶槽谷地区的塘堰工程规模小，导致对来水的调节能力不强，无法将雨水有效汇集，反而产生大量的弃水，造成雨水资源的浪费，应增加塘堰容量，提高研究区蓄水能力。

(4)当降雨频率分别为 P=50%、75%和 95%时，重庆岩溶槽谷地区相应的塘堰复蓄次数为 2.51、2.60和 2.12。根据罗志远等[31]研究长江流域多个水库的复蓄次数范围为 0.97～5.22，本文所计算的三种不同降雨频率下的复蓄次数都在此范围内，与其研究结果相符。蒋尚民等[8]在江淮丘陵地区的计算结果是当降雨频率分别为 P=50%、75%和 95%时，复蓄次数为 1.73、3.66、0.72。本文的计算结果是江淮丘陵地区计算结果的 1.5～3 倍，出现这种结果的原因是重庆地区年平均降雨量大于江淮丘陵地区 100 mm 左右，塘堰工程的来水量也就大于江淮丘陵地区。另外，重庆岩溶槽谷地区地貌类型特殊，与丘陵地区相比渗透较强，故塘堰工程所蓄存的水更易流失。同时研究区的塘堰容量与其他地区相比较小，所以塘堰内所存的水蓄泄速度更快。

参考文献

[1] 张建新，郑大玮. 国内外集雨农业研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究，2005，23(2)：223－229.

[2] 孙鸿烈. 中国生态系统(下册)[M]. 北京：科学出版社，2005：12－15.

[3] 戴明宏，张军以，王腊春，等. 西南岩溶小流域农业可持续发展优化模式研究[J]. 中国岩溶，2015，34(3)：254－259.

[4] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. 南方国土资源，2003，(1)：22－25.

[5] 朱海彬，任晓冬，李开忠. 贵州喀斯特地区表层岩溶带水资源开发利用研究[J]. 中国农村水利水电，2015，(2)：60－63，77.

[6] 袁道先. 我国西南岩溶山地的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展，1997，19(5)：41－43.

[7] 仇锦先，罗金耀. 新沂山丘区雨水利用蓄水设施复蓄次数的确定[J]. 水利水电科技进展，2009，29(4)：59－62.

[8] 蒋尚明，金菊良，许浒，等. 基于径流曲线数模型的江淮丘陵区塘堰复蓄次数计算模型[J]. 农业工程学报，2013，29(18)：117－124.

[9] 周振民，张淙皎. 灌区天然径流计算方法理论研究[J]. 人民长江，2004，35(2)：25－26.

[10] 刘家福，蒋卫国，占文凤，等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究，2010，17(2)：120－124.

[11] 伍宇春，傅瓦利，程辉，等. 岩溶区坡耕地土壤肥力综合评价：以重庆中梁山坡耕地样区为例[J]. 中国岩溶，2014，33(2)：223－230.

[12] William J R, Lasear W V. Water yield model using curve numbers [J]. Journal of Hydraulics Division, 1976, (9): 1221－1253.

[13] Bosznay, Miklos Generalization of SCS curve number method [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1989, 115 (1): 139－144.

[14] 徐秋宁，马孝义，安梦雄，等. SCS 模型在小型集水区降雨径流计算中的应用[J]. 西南农业大学学报，2002，24(2)：97－100.

[15] Mishra, Surendra K, Singh, et al. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(7): 1291－1313.

[16] 周玉良，刘丽，金菊良，等. 基于 SCS 和 USLE 的程海总磷总氮参照状态推断[J]. 地理科学，2012，32(6)：725－730.

[17] 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.

[18] 符素华，王向亮，王红叶，等. SCS－CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理，2012，35(3)：415－421.

[19] 孙艳玲，谢德体，刘洪斌，等. 基于 DEM 的流域降雨径流模拟

万方数据

研究:以三峡库区晏家河小流域为例[J]. 水土保持学报,2004,18(1):82－84.

[20] 赵晨辉,吴耀国,孙庆义. 基于 GIS 的分布式流域水文模型[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(1):39－43.

[21] 刘涓,张仕超,魏朝富. 西南丘陵山区塘堰系统对农田水量平衡的局地调控作用[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(3):43－47.

[22] 谢立群,郑淑红. 作物需水量的计算方法[J]. 农业与技术,2007,27(1):128－129.

[23] 沈冰,黄红虎. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:14.

[24] 李万义. 适用于全国范围的水面蒸发量计算模型的研究[J]. 水文,2000,20(4):13－17.

[25] Maidment D R(张建云,李纪生,等译). Handbook of Hydrology[M]. 北京:科学出版社,2002:178－368.

[26] 郑畅,倪九派,魏朝富. 基于 DEM 和 SCS 模型的四川盆地丘陵区局地径流研究[J]. 水土保持学报,2008,22(5):73－77.

[27] 王庆. 江淮丘陵易旱地区塘堰系统可供水量的计算[D]. 合肥工业大学,2012.

[28] 王英,黄明斌. 径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J]. 中国水土保持科学,2008,12(6):87－91.

[29] 贾晓青,杜欣,赵旭峰,等. 改进 SCS 产流模型在岩溶地区径流模拟中的应用[J]. 人民长江,2008,39(11):25－27.

[30] 罗鉴银,谢世友. 重庆市水资源供需预测[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2002,27(4):592－595.

[31] 罗志远,罗骏燕,杨全明,等. 湿润区水库复蓄系数与库容系数关系研究[J]. 中国农村水利水电,2011,(3):68－69.

[32] 郑祖金,崔远来,董斌,等. 灌区塘堰拦蓄地表径流能力的研究[J]. 中国农村水利水电,2005,(1):39－40.

Computational model of pond re-storage times in karst valley area of Chongqing based on DEM and SCS models

ZUO Feng-lin, WEI Cao-fu

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract Two typical karst valley areas in Zhongliang and Yunfeng town of Jiu Longpo district, Chongqing are selected as the study area which is located in the middle and east sides of Zhongliangshan Mountains. The study area, with an area of 532.3 hm^2 and an elevation ranging from 300 to 700 m above mean sea level, lies between the latitudes of 106°23′49″ to 106°25′06″E and the longitudes of 29°26′20″ to 29°29′47″N. The area falls in humid subtropical monsoon climate region, with an average annual precipitation of about 1,027.3 mm and an average annual temperature of 17.3 ℃. Landform types of the area are karst valley and a typical anticline low mountain, where the soil types include yellow limestone soil, dark purple clay and ore sub soil; and land use patterns are dominated by forest land and upland. Hydrologically, as no main stream and tributary run through the area, pond facilities which impound rainwater have become main sources for irrigation in this area. In fact the use of ponding water has been of significance in small scale water supply and to solve the problem of water shortage in southwest China karst region. The number of pond rainwater re-storage is an important parameter in determining the quantity of water supply. Through the analysis of current problem of irrigation systems and the computation of the number of repeated pond water impoundment, it attempts to provide a scientific guidance for future planning of ponding water system in southwest China karst region. In order to predict the repeated impoundment number, SCS model was used to simulate rainfall runoff and crop water requirement, the latter of which was computed by CROPWAT8.0 in this study. Then a water balance analysis of the pond irrigation system was performed and consequently repeated impoundment number of the ponding system was sorted out. The results showed that, (1) Calculated runoff coefficient of the study area by the SCS model was from 0.16 to 0.27, which suggested that the runoff simulated by the model was reasonable; (2) In karst valley area, it is much better to use a catchment as an analytical unit than an administrative area to calculate water supply of the pond facilities; (3) In the low flow year, rainwater can be most efficiently used by the ponds in the karst valleys with a minimum rate of surplus water as 50.98%; (4) The study area of pond re-storage times were 2.51, 2.60, 2.12 in correspondence to the rainfall frequency of 50%, 75%, 95%, respectively.

Key words SCS model, DEM, catchment, pond re-storage times, karst valley area of Chongqing

(编辑　黄晨晖)

万方数据