

豫西山地生活用雨水集流系统的设计计算

管华, 陶立新

(河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475001)

摘要: 生活用雨水集流系统设计计算的任务, 就是确定最优的集流场面积和贮水窖容积, 即满足生活供水需求的集流场面积和贮水窖容积的最小值。以频率为 75% 和 95% 的特征水文年为基本计算年份, 以降雨期的降水量、间雨期持续日数、最大间雨期日数和人均日需水指标为参数, 根据逐日降水资料, 计算出豫西山地各代表站的最优贮水窖容积和最优集流场面积。

关键词: 豫西山地; 生活用雨水; 集流系统; 贮水窖容积; 集流场面积

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2002)05-0036-04

中图分类号: S274.2

Design of Rainwater Catchment System for Life Purposes in Mountainous Area of West He'nan Province

GUAN Hua, TAO Li-xin

(College of Environment and Planning, He'nan University, Kaifeng 475001, He'nan Province, China)

Abstract The tasks of the design calculation of rainwater catchment system for life purposes are determining the optimum rate area of rainwater catching field and the first rate volume of water cellar, which are the minimum area of rainwater catching field and the minimum volume of water cellar which can meet the needs of supplying life with water. Taking the characteristic hydrologic year that its frequency is 75% and 95% as the basic calculating years, and taking the precipitations of rainfall periods, the days of non-rainfall periods, the days of the maximum non-rainfall period and the index of per capita water need as the parameters, according to the precipitation data day by day, the first rate volumes of water cellars and the first rate areas of rainwater catching fields in the mountain areas of west He'nan province are calculated.

Keywords the mountain area of west He'nan province; rainwater catchment system; life purposes; area of rainwater catching field; volume of water cellar

豫西山地处于河南省西半部, 自北向南依次为太行山脉、豫西黄土丘陵、嵩箕山脉和伏牛山脉, 地形以低山、丘陵为主。此地属于我国半湿润和半干旱水分过渡区, 年降水量介于 500~1100 mm, 年内分配极为不均, 80%~95% 集中于汛期(6~9月), 水资源严重不足。尤其是北部太行山石灰岩山地和中部豫西黄土丘陵区, 年降水量大多不足 600 mm, 水资源紧缺程度更甚, 每年都有相当长的时期居民生活用水紧缺。豫西山地缺少修建大型水库的地形, 农村居民点又相对分散, 以集流场和贮水窖为主要组成部分的窑窖式雨水集流系统具有规模小、布局灵活、投资少、集流效率高、修建技术简单等优点, 在当地具有很大的推广意义。目前全国生活用雨水集流系统建造数量不少, 但是对其设计计算方法的探讨不多, 方法尚不成熟。生活用雨水集流系统设计计算的任务, 就是确定最优

的集流场面积和贮水窖容积, 即满足生活供水需求的集流场面积和贮水窖容积的最小值。以已有的设计计算方法来进行设计计算, 难以保证得到的设计结果为最优结果^[1]。限于各自的特点, 农业灌溉用雨水集流系统的设计计算方法不适用于生活用雨水集流系统的设计计算^[2]。本文在探讨生活用雨水集流系统设计计算方法的基础上, 进行豫西山地代表站的生活用雨水集流系统设计计算, 旨在为生活用雨水集流系统在当地的推广提供科学依据。

1 基本思路

窑窖式雨水集流系统主要由收集大气降水的集流场和贮存降水的贮水窖组成。集流场的作用在于直接收集大气降雨, 以减少自然下垫面汇流过程中因蒸发、下渗等而形成的水量损失, 增大降雨的产流量; 贮

收稿日期: 2002-06-12

资助项目: 国家社会科学基金项目“集雨背景下的中国西部农业可持续发展研究”(00BJY035); 河南省自然科学基金项目“河南省典型社区天然降雨资源化的定位试验研究”(9407600)

作者简介: 管华(1958-), 男(汉族), 河南濮阳人, 教授。主要从事水文水资源、水土保持等领域的研究, 已发表论文 50 余篇, 出版著作 5 部, 曾获河南省科技进步奖二等奖和三等奖各 1 项, 获河南省自然科学优秀论文一等奖 1 项。电话: (0378) 2867622

水窖的作用是把集流场在降雨期收集的水量贮存起来,以供间雨期之用。雨水集流系统优化设计的目的,在于确定最优的集流场面积和贮水窖容积。最优的集流场面积和贮水窖容积满足这样的条件: 它们的规模是满足生活供水需求的最小值。这样既能够满足各间雨期居民生活用水的需要,又可使建造投资最小。因此,雨水集流系统设计的实质,就是确定集流场面积和贮水窖容积最小值的极限设计。

豫西山地区的降水量主要集中于汛期,故生活用雨水集流系统设计的关键是处理好汛期降水,即尽可能贮存汛期降水以供间雨期使用。间雨期生活需水量由人口用水和牲畜用水两部分组成,其数量的多少,前者取决于间雨期日数 n_i (i 为间雨期数)、人均日生活需水指标 r_p 和区域人口数量,后者取决于间雨期日数 n_i 、畜均日生活需水指标 r_a 和牲畜数量。当设计以单人和单畜为单位时,则各间雨期的生活需水量 W_i 等于人均日生活需水指标 r_p 与间雨期日数 n_i 的乘积和畜均日需水指标 r_a 与间雨期日数 n_i 的乘积之和:

$$W_i = r_p n_i + r_a n_i = n_i (r_p + r_a) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

在贮水窖贮满水的情况下,各间雨期的人均生活需水量 W_i 即为各间雨期人均生活用水所需的贮水窖容积,即 $W_i = V_i$ 。以各间雨期人均生活用水所需贮水窖容积 V_i 的最大值作为贮水窖的设计容积,在贮满水的情况下,该容积既可以满足任一雨期间的生活用水需要,又不会因贮水窖容积的过大而形成建造投资的浪费,可以认为是最优的贮水窖容积 V^* ,即 V^*

$= \max \{V_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 在数值上,它是人均日生活需水指标 r_p 与最大间雨期日数 n_m 的乘积和畜均日需水指标 r_a 与最大间雨期日数 n_m 的乘积之和,即

$$V^* = r_p n_m + r_a n_m = n_m (r_p + r_a) \quad (2)$$

在降雨量一定的条件下,雨水集流系统收集水量的多少,取决于集流场面积 F 的大小。如要使集流场在各降雨期中所收集的水量,满足之后各相邻间雨期的生活用水需求,集流场的面积 F_i 在数值上至少应等于各间雨期生活用水所需贮水窖容积 V_i 与期前相邻各降雨期的降雨量 P_i 之商,即

$$F_i = V_i / P_i \quad (3)$$

要使集流场面积达到最优,应取 V_i 的最大值 V^* 和 P_i 的最小值 P_{\min} 作为计算最优集流场面积 F^* 的参数,即

$$F^* = V^* / P_{\min} \quad (4)$$

该面积可保证即使贮水窖在各降雨期中贮满水,又不会因集流场面积过大造成建造投资的浪费。

为了方便各地区在建造雨水集流系统时对不同水平年的选择,使计算得到的雨水集流系统能够满足偏枯年份和枯水年份生活供水的要求,以下设计计算将选取频率 P 为 75% 和 95% 的两种水平年。定义以最大降雨期初日为初日、以次年最大降雨期初日的前一天为终日的时期为计算周期年。为了保证设计计算结果为最优的集流场面积和贮水窖容积,以下设计计算将采用典型年法选取各地不同频率水平年的典型年,并取与各典型年相对应的计算周期年为基本计算年份(表 1)。

表 1 豫西山地代表站频率 75% 和 95% 的计算周期年

| 代表站 | 频率 | 计算周期年 | 代表站 | 频率 | 计算周期年 |
|-----|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|
| 林 县 | 75% | 19660723- 19670628 | 登 封 | 75% | 19660720- 19670629 |
| | 95% | 19780721- 19790627 | | 95% | 19650708- 19660719 |
| 鹤 壁 | 75% | 19740806- 19750803 | 宜 阳 | 75% | 19690920- 19700727 |
| | 95% | 19650708- 19660719 | | 95% | 19650708- 19660719 |
| 焦 作 | 75% | 19720901- 19730717 | 洛 宁 | 75% | 19660306- 19670315 |
| | 95% | 19650705- 19660719 | | 95% | 19770422- 19780626 |
| 博 爱 | 75% | 19720528- 19930428 | 灵 宝 | 75% | 19690920- 19700630 |
| | 95% | 19760718- 19770724 | | 95% | 19720827- 19730629 |
| 沁 阳 | 75% | 19760718- 19770623 | 汝 州 | 75% | 19650708- 19660719 |
| | 95% | 19650708- 19660720 | | 95% | 19660720- 19670815 |
| 孟 县 | 75% | 19760717- 19770709 | 汝 阳 | 75% | 19780709- 19790725 |
| | 95% | 19650708- 19660719 | | 95% | 19661003- 19670822 |
| 孟 津 | 75% | 19700728- 19710606 | 嵩 县 | 75% | 19760724- 19770709 |
| | 95% | 19651029- 19660720 | | 95% | 19660720- 19670629 |
| 新 安 | 75% | 19700422- 19710501 | 鲁 山 | 75% | 19650421- 19660423 |
| | 95% | 19650708- 19660720 | | 95% | 19660722- 19670709 |
| 三门峡 | 75% | 19690920- 19700526 | 栾 川 | 75% | 19730701- 19740827 |
| | 95% | 19720824- 19730629 | | 95% | 19690920- 19700721 |

2 贮水窖容积的设计计算

生活用窖窖式雨水集流系统的设计计算方法的指导思想,是在全年整个集雨过程中,要求在最大降雨期末将贮水窖贮满。考虑到集流场产流的最小降雨量需求,定义日降水量 $\geq 5\text{mm}$ 的日期为有效降雨日。据实地调查,在所有的有效降雨日中,当地居民生活用水不取用贮水窖之水,而利用其它水源之水(如山涧河川水或泉水),而在间雨期则取用贮水窖之水;当地居民的生活用水由人口生活用水和牲畜饲养用水所构成,牲畜以黄牛为主,黄牛饲养量为人均 1 头。设

频率为 75% 和 95% 的水文年的最大间雨期每人每日生活用水量和每头黄牛每日用水量为相应水平年的标准贮水窖容积 V ,在数值上为人均日生活需水指标 r_p 和畜均日生活需水指标 r_a 之和与最大间雨期日数 n_m 的乘积,即

$$V = n_m (r_p + r_a) \quad (5)$$

此值即为最优贮水窖容积。根据各站的逐日降水资料,统计出各站频率为 75% 和 95% 的特征水文年的最大间雨日数,并取人均日需水指标 r 为 20 L/d, 畜均日需水指标 r 为 16 L/d^[3],计算得到豫西山地各站最优的贮水窖容积(表 2)。

表 2 豫西山地贮水窖容积设计计算结果

| 代表站 | 最大间雨期日数 n_m | | 标准贮水窖容积 V / m^3 | | 代表站 | 最大间雨期日数 n_m | | 标准贮水窖容积 V / m^3 | |
|-----|---------------|-----|--------------------------|------|-----|---------------|-----|--------------------------|------|
| | 75% | 95% | 75% | 95% | | 75% | 95% | 75% | 95% |
| 林 县 | 73 | 85 | 2.63 | 3.06 | 登 封 | 73 | 103 | 2.63 | 3.71 |
| 鹤 壁 | 105 | 104 | 3.78 | 3.74 | 宜 阳 | 97 | 102 | 3.49 | 3.67 |
| 焦 作 | 36 | 104 | 1.30 | 3.74 | 洛 宁 | 42 | 46 | 1.51 | 1.66 |
| 博 爱 | 37 | 170 | 1.33 | 6.12 | 灵 宝 | 99 | 66 | 3.56 | 2.38 |
| 沁 阳 | 170 | 104 | 6.12 | 3.74 | 汝 州 | 104 | 121 | 3.74 | 4.36 |
| 孟 县 | 163 | 106 | 5.87 | 3.82 | 汝 阳 | 36 | 73 | 1.30 | 2.63 |
| 孟 津 | 54 | 115 | 1.94 | 4.14 | 嵩 县 | 50 | 73 | 1.80 | 2.63 |
| 新 安 | 98 | 103 | 3.53 | 3.71 | 鲁 山 | 75 | 37 | 2.70 | 1.33 |
| 三门峡 | 144 | 75 | 5.18 | 2.70 | 栾 川 | 64 | 97 | 2.30 | 3.49 |

3 集流场面积的设计计算

根据上述基本思路,在最大降雨期之末,贮水窖之内的水量保持贮满状态。之后的各间雨期中所取用的水量,均要在随后的降雨期内得到补足,以保证最大间雨期之初贮水窖处于贮满状态。在最大间雨期之末,贮水窖之内的水量已取用殆尽,如欲在随后的降雨期中重新使贮水窖贮满,则需集流场面积过大,故而认为最大间雨期之后各降雨期的补水量为下个间雨期生活需水量即可。至于这时贮水窖距贮满状态所缺的水量,则等到最大连续降雨期时再补足。这样,全年除最大降雨期和最大间雨期之外的全部时间就可分为两个时期,第一时期是自最大降雨期终日至最大间雨期初日,第二时期是自最大间雨期终日至次年最大降雨期初日。这 2 个时期内的降雨期需补水量的衡量指标不同,补水所需集流场面积的设计计算方法亦有所区别。

在第一时期,各间雨期之初,贮水窖处于贮满状态。经过间雨期间的水量取用,各间雨期末贮水窖贮水量有所减少。各降雨期的补水目标,就是补足其前间雨期的取用水量,使贮水窖重新处于贮满状态。各

降雨期补水所需的集流场面积 F_i ,可根据每个间雨期之末为使贮水窖贮满需补水量和随后的每次降雨量来确定,它们为每个间雨期之末需补水量 W_i 与其后各降雨期的降雨量 P_i 之商,即

$$F_i = W_i / P_i = n_i (r_p + r_a) / P_i \quad (6)$$

在第二时期,最大间雨期之末贮水窖处于空窖状态。每个降雨期的补水目标,就是使贮水窖贮存足够的水量,以供随后的各间雨期生活之用。各降雨期补水所需的集流场面积 F_j ,可根据每个间雨期人均生活需水量、畜均生活需水量和其前每个降雨期的降雨量来确定,它们为各个间雨期人均和畜均生活需水量 W_j 与其前各降雨期的降雨量 P_j 之商,即

$$F_j = W_j / P_j = n_i (r_p + r_a) / P_j \quad (7)$$

在最大降雨期之初,贮水窖处于空窖状态。要使贮水窖在最大降雨期末贮满水,则需要的集流场面积 F_m 为

$$F_m = V / P_m \quad (8)$$

式中: P_m ——最大降雨期的降雨量。

(1) 若集流场面积最大值为第一时期中的某个集流场面积 F_{ik} 或最大降雨期集流场面积 F_m ,则集流场面积最优值为该集流场面积 F_{ik} 或 F_m ,即

$$F^* = F_k, F_m | F_{ik} \in F_i, F_{ik}, F_m = \max\{f\} \quad (9)$$

(2) 若集流场面积最大值为由第二时期内的第一降雨期降雨量 P_{j1} 和第一间雨期日数 n_{j1} 求得的集流场面积 F_{j1} , 则集流场面积最优值为该集流场面积

$$F^* = F_{j1}, F_{j1} = \max\{f\} \quad (10)$$

(3) 若集流场面积最大值为第二时期内除 F_{j1} 之外的任一集流场面积 F_{jk} , 则应考虑第一降雨期至第 k 降雨期各期降雨所形成的贮水集存量对第 k 间雨期的供水能力。这时, 应将取 F_i 和 F_j 中所有的大于 F_{j1} 的集流场面积由大到小依次排列, 逐个试算, 检出其中全部的满足对第 k 间雨期供水要求的各个集流场面积 F_d , 即它们满足条件

$$F_d \sum_{i=1}^{k-1} P_{ij} - r \sum_{i=1}^{k-1} n_{j1} \geq 0 \quad (11)$$

集流场面积最优值即为满足条件 (11) 的集流场面积集合要素的最小值, 即

$$F^* = \min\{F_d\}, F_j = \max\{f\}, j \neq 1 \quad (12)$$

如果备选集流场面积在由大到小逐个被试的过程中, 一旦轮到第一时期中的集流场面积、最大降雨期集流场面积或第二时期第一降雨期集流场面积被试并满足条件 (11), 不论其后是否还有满足条件 (11) 的备选集流场面积, 都不再进行试算, 而将该满足条件 (11) 第一时期中的集流场面积或最大降雨期集流场面积作为最优集流场面积。

根据各站的逐日降水资料, 统计得到各站频率为 75% 和 95% 的特征水文年度的各降雨期及其有效降水量和各间雨期及其日数, 进而计算得到各站最优的集流场面积 (表 3)。

表 3 豫西山地代表站集流场面积设计计算结果 m^2

| 频率 | 75% | 95% | 频率 | 75% | 95% |
|-----|--------|--------|----|--------|--------|
| 鹤壁 | 51.43 | 126.36 | 宜阳 | 84.01 | 72.00 |
| 林县 | 205.72 | 252.63 | 登封 | 48.82 | 70.72 |
| 焦作 | 190.19 | 162.74 | 洛宁 | 55.39 | 118.87 |
| 博爱 | 207.81 | 264.01 | 灵宝 | 126.00 | 205.06 |
| 沁阳 | 157.81 | 83.63 | 汝州 | 61.13 | 138.01 |
| 孟县 | 124.15 | 94.09 | 汝阳 | 78.91 | 56.93 |
| 孟津 | 266.58 | 112.16 | 嵩县 | 247.50 | 54.70 |
| 新安 | 110.27 | 65.63 | 鲁山 | 190.58 | 61.02 |
| 三门峡 | 67.91 | 294.14 | 栾川 | 121.93 | 113.15 |

4 结 语

对生活用雨水集流系统设计计算的最基本要求, 就是要确定出最优的集流场面积和贮水窖容积, 即满足生活供水需求的集流场面积和贮水窖容积的最小值。本文提出的生活用雨水集流系统设计计算方法, 可以满足这一要求。本设计计算方法在河南省卫辉市及新安县的应用实践中得到证明^[4]。

限于资料的缺乏, 本文在豫西山地生活用雨水集流系统的设计计算中, 没有考虑集流场的产水效率。实际中的产流系数总是小于 1 的。虽然本文在计算过程中采用的是有效降雨量, 这在一定程度上弥补了未考虑产流系数的缺陷, 但是这种处理方法是存在着误差的, 会使集流场面积计算结果偏离最优值。另外, 本文在计算过程中仅考虑了居民生活用水和牲畜饲养用水, 而未考虑农村居民的其它生活用水需求, 这也将使计算结果偏小。因此, 本设计计算结果用于豫西山地的实际时, 最好是再乘以一个大于 1 的系数进行放大, 或者采用水资源供需分析中常用的方法, 安排 20% 的不可预见预留量。

在表 2 和表 3 中所示的各站贮水窖和集流场设计计算结果中, 有数站 75% 水平年的数值大于 95% 水平年的数值, 这与一般的认识是不相一致的。造成这种结果的原因, 是这些站 95% 水平年典型年的降雨过程的年内分配较 75% 水平年典型年均匀, 各间雨期的日数较少, 从而使各次降雨的补水任务量较小。如何避免因典型年降雨过程分配情况特殊而导致的设计计算结果的不合理性, 是一个有待进一步探讨的问题。

[参 考 文 献]

[1] John E. Gould. 国际雨水集流系统家庭应用的进展和展望 [J]. 水文, 1993(6): 61- 65.
 [2] 管华. 豫西山地农业灌溉雨水集流系统设计研究 [J]. 资源科学. 1998(3): 26- 31.
 [3] 管华. 水资源学概论 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2000. 103- 106.
 [4] 丁圣彦, 等. 河南道士坟集水农业的试验研究 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 1997(4): 61- 69.