

汛限水位动态控制在石门水库主汛期调度中的应用研究

黄灵芝, 李守义, 司政

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在汛限水位静态控制的运行方式下常导致水库汛期不敢蓄水,汛后库水位却常常达不到正常蓄水位,极大地限制了水库兴利效益,造成水资源浪费。以石门水库为例,针对其静态汛限水位运行的现状,分析该运行方式下对水库兴利效益的影响,提出采用汛限水位动态控制的方法来提高水资源利用率。实际调度中,结合石门水库天气、水文等预报信息,采用预蓄预泄方法,分析汛限水位动态控制的上下限,给出了动态控制的调度策略,并以“20110728”洪水对比了两种调度方式。结果表明:当预报降雨或洪水偏小时,可抬高汛限水位最高至617.5 m,拦蓄洪尾,有效增加水库的蓄水量;当预报降雨或洪水偏大时,可降低汛限水位最低至610.0 m,腾空库容,迎接洪水。

关键词: 汛限水位; 动态控制; 控制域; 调度方法; 主汛期; 石门水库

中图分类号:TV697.1⁺1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)03-0146-05

Research on limited water level dynamic control of Shimen reservoir dispatch in the main flood season

HUANG Lingzhi, LI Shouyi, SI Zheng

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The reservoir always can't achieve its normal level for it is not allowed to store water in flood season when its limited water level is under static control. This operation will reduce the reservoir's benefit largely, and waste lots of water resource. This article takes Shimen reservoir as example, through summarizing the present situation of the static operation of limited water level, influence on the benefit of the reservoir is analyzed following this method, and dynamic control of flood limited water level is put forward to improve water use efficiency. In the actual dispatching, the upper and lower limits of the dynamic control of the flood limit are analyzed by using the pre-storage and pre-discharge method according to its hydrological and weather forecast information, and the dynamic control scheduling strategy is given. Comparing two different dispatching modes by “20110728” flood process, the results show that when the precipitation or flood forecast is light, flood control level can be raised to 617.5m mostly to enlarge the reservoir's storage; then if the forecast is heavy, flood control level will be lowered to 610.0m to empty reservoir to keep its safety.

Key words: flood control level; dynamic control; control field; dispatching mode; the main flood season; Shimen reservoir

1 研究背景

水库汛期限制水位静态控制下的运行方式为:一旦水库水位高于汛限水位,要求立即开启泄洪设施泄洪弃水,将汛限水位以上的蓄水尽快泄掉,严格保证

水库实际水位不超过所设计的汛限水位,预留出较大的水库库容储蓄可能到来的设计或校核洪水。但设计、校核洪水并不常遇,一旦后续来水不足,这种调度方式会较大地限制水库兴利效益的发挥^[1]。

为了更好地解决水库汛期弃水而汛后又缺水的

收稿日期:2016-10-08; 修回日期:2017-02-09

基金项目:陕西省水利厅科技计划项目(2014slkj-16); 国家自然科学基金项目(51409207、51609200)

作者简介:黄灵芝(1982-),女,湖北松滋人,博士,讲师,主要从事水库调度风险分析。

矛盾,实现洪水资源化^[2],打破汛限水位静态控制,基于一定的可接受风险实施动态控制是水库调度的发展趋势,很多学者进行了相关研究。刘攀等^[3]对隔河岩水库进行了分期汛限水位控制并计算了其风险效益。冯平等^[4-5]分别分析了预报误差对汛限水位动态控制的影响及水库泄流能力不确定性和典型洪水因子下提高汛限水位的可能性。邓辉等^[6]考虑典型洪水和调度滞时风险因子采用蒙特卡罗方法对万家寨水库分期汛限水位控制进行了风险研究。袁晶瑄等^[7]针对白龟山水库,以全区累积净雨为水库预报调度的主要判断指标,定量计算了不同调度方式下的防洪风险。何晓燕等^[8]则提出了水库汛限水位动态控制风险的概念,并系统地给出了动态控制的评价原则。本文以汉中市石门水库为例,在满足原设计防洪安全要求的前提下,重新设计汛限水位动态控制范围的上下限。即在实时调度中,根据洪水预报信息、降雨预报信息等,适时抬高汛限水位至上限,达到提高洪水资源利用率的目的;也可在一定条件下降低汛限水位,保证兴利蓄水和提高防洪能力,最大程度地实现洪水资源化。

2 汛限水位动态控制的原理

汛限水位动态控制是指在所预报的洪水发生前一段时间内或洪水的起涨段,加大泄洪力度预泄库内蓄水,使水库水位消落到汛限水位以下;随着入库洪水流量增大,库水位上升至汛限水位时,水库开始蓄洪,按常规调度方法进行调度;至洪水的退水段,再拦蓄洪尾至汛限水位以上,但确保在下次洪水来临前能利用发电或泄洪设备成功消落超蓄水量^[9]。图1即为在入库洪水退水段拦蓄洪水的示意图。

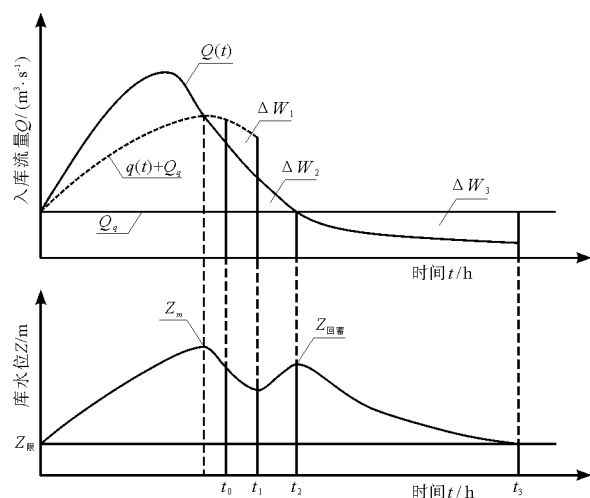


图1 入库洪水退水段拦蓄洪尾的调度示意图

图1中: $Q(t)$ 为入库洪水过程, m^3/s ; $q(t)$ 为水库泄洪设施的泄流过程线, m^3/s ,具体可由水库的调洪规则确定; Q_q 为机组满发流量, m^3/s ,近似取为常数。其余, t_0 为决策时刻,该时刻对应水库的蓄水量为 V_0 ; t_1 为关闸时刻,对应的水库蓄水量为 V_1 ; t_2 为关闸后水库蓄至最高水位的时刻,对应的水库蓄水量为 V_2 ; t_3 为水库关闸后以机组最大引水流量 Q_q 泄水至汛限水位 $Z_{\text{限}}$ 的时刻; ΔW_1 为决策时刻到关闸时刻期间总泄量与入库水量之差, m^3 ; ΔW_2 为水库关闸之后拦蓄的水量, m^3 ; ΔW_3 为水库实际发生的超蓄水量, m^3 ; Z_m 为最高水位, m ; $Z_{\text{回蓄}}$ 为拦蓄洪尾过程中发生的最高水位,即超蓄水位, m 。结合实际调度给出的超蓄方案及水库的库容曲线,可以计算求得关闸时刻和库水位降至汛限水位的时刻。计算原理为^[10-11]:

由图1的曲线关系可明显看出,在 $t_0 \sim t_1$ 期间水库泄流能力大于入库流量,所以水库通过预泄可腾出库容 ΔW_1 :

$$\Delta W_1 = \int_{t_0}^{t_1} (q(t) + Q_q - Q(t)) dt \quad (1)$$

$t_1 \sim t_2$ 时间段水库的净储水量为

$$\Delta W_2 = \int_{t_1}^{t_2} (Q(t) - Q_q) dt \quad (2)$$

另建立水量平衡方程

$$V_0 - \Delta W_1 + \Delta W_2 = V_2 \quad (3)$$

$$\text{即: } V_0 - \int_{t_0}^{t_1} (q(t) + Q_q - Q(t)) dt +$$

$$\int_{t_1}^{t_2} (Q(t) - Q_q) dt = V_2 \quad (4)$$

$$V_0 + \int_{t_0}^{t_2} Q(t) dt - \int_{t_0}^{t_2} q(t) dt - Q_q(t_2 - t_0) = V_2$$

$$(5)$$

公式(1)~(5)中只有 t_1 一个未知数,可用试算法求解。

另外,对于 t_2 时刻,建立由蓄水位 Z_2 消落到防洪限制水位 $Z_{\text{限}}$ 这段过程的水量平衡,即为:

$$V_2 - \int_{t_2}^{t_3} (Q_q - Q(t)) dt = V_{\text{限}} \quad (6)$$

$$\text{即 } V_2 - Q_q(t_3 - t_2) + \int_{t_2}^{t_3} Q(t) dt = V_{\text{限}} \quad (7)$$

给定退水过程 $Q(t)$,可求出 t_3 。

超蓄运用一般发生在洪水的退水段,容许蓄洪量取决于歇洪间期内的水库下泄能力^[12],若取值歇洪间期即为消落时间,则可通过歇洪间期逆推求得可行的超蓄水位。

3 汛限水位动态控制域的确定

3.1 汛限水位动态控制上限的确定步骤

(1) 计算有效预泄时间

按照公式(8) 计算有效预泄时间,即

$$T_y = T_j - T_{cu} \quad (8)$$

式中: T_y 为考虑流域产流与降雨洪水预影响后的有效预泄时间,h; T_j 为考虑流域产流与降雨洪水预报影响后的预泄总时间,h; T_{cu} 为预报作业、信息传递、决策、开闸等中间环节可能消耗的时间之和^[13],h。

(2) 计算允许预蓄水量

首先,根据有效预泄时间内的综合退水曲线求平均入库流量 Q_{in} 。其关键是退水曲线如何取值,一般可根据历史退水期的调度经验,或者统计多场洪水的始退流量取其平均值。然后,将下游最低级别的防洪目标安全所允许的泄量 q_{an} 取作出库流量 q_{out} 。则计算预蓄水量 w_{yx} 如下式:

$$w_{yx} = (q_{out} - Q_{in}) T_y \times 3600 \quad (9)$$

式中符号意义同前,流量单位均为 m^3/s ,水量单位为 m^3 。

(3) 汛限水位动态控制域上限值 Z_d^+ 的计算

已知预蓄水量 w_{yx} 、原设计汛限水位所相应的库容量 $V(Z_d^0)$,以 $[V(Z_d^0) + w_{yx}]$ 值查水位-库容关系曲线,用公式(10) 求 Z_d^+ ,即

$$Z_d^+ = f[V(Z_d^0) + w_{yx}] \quad (10)$$

式中符号意义同前,水位单位为 m,水量单位为 m^3 。

3.2 石门水库汛限水位动态控制的上限

石门水库建于 20 世纪 60 年代,位于汉江上游左岸一级支流褒河的下流,具有灌溉、发电、防洪等综合效益。设计洪水标准为 100 年一遇,校核洪水标准为 1000 年一遇,设计洪水位 618.0 m,校核洪水位 619.5 m。工程总库容 $1.098 \times 10^8 m^3$,其中,防洪库容 $0.148 \times 10^8 m^3$ 。泄水建筑物主要包括 6 孔泄洪中孔、1 孔底孔和左岸泄洪洞。泄洪中孔最大总泄量 $5\,640 m^3/s$,出口最大单宽流量 $134 m^3/(s \cdot m)$ 。排沙底孔底坎高程 550.0 m,设计泄量 $125 m^3/s$ ^[14]。

石门水库在汛期防洪调度管控中,以静态汛限水位 615.0 m 应对不同标准洪水。近年来,褒河流域径流量呈明显下降趋势,常常遇到洪水过后长历时干旱无雨、灌溉供水水源短缺、预期效益难以保证的窘境,探讨改进其汛限水位运行调度方式,以最大程度实现洪水资源化已十分紧迫。

3.2.1 有效预泄时间 T_y 石门水库流域天气预报、水文预报均采用 6 h 滚动预报,根据洪水产流预报的精度分析可知,6 h 内的预报精度满足汛限水位动态控制的要求。考虑信息传递、决策、开闸等时间,取有效预泄时间 T_y 为 5.5 h。

若下游第 1 级防洪安全允许泄量为 q_{out} ,当下游防洪安全留有余地时,可按照石门水库设计 20% 频率洪水下泄。预泄期的泄流量取值 $q_{an} = 1\,000 m^3/s$ 。

3.2.2 允许预蓄水量 w_{yx} 通过多场有弃水洪水的分析,以水位开始下降时的来水量作为标准,经过多次洪水统计,取始退流量平均值为 $600 m^3/s$ 。

已知: $Q_{in} = 1\,000 m^3/s$, $T_y = 5.5 h$, $q_{an} = 600 m^3/s$,代入公式(9)求得允许预蓄水量为:

$$w_{yx} = (q_{out} - Q_{in}) T_y \times 3600 = (1000 - 600) \times 5.5 \times 3600 = 7.92 \times 10^6 m^3$$

3.2.3 计算汛限水位动态控制域上限值 Z_d^+ 已知:允许预蓄水量 $w_{yx} = 7.92 \times 10^6 m^3$,原设计汛限水位 615.0 m,对应的库容量 $V(615.0) = 49.54 \times 10^6 m^3$,代入公式(10)中,求得:

$$\begin{aligned} Z_d^+ &= f[V(Z_d^0) + w_{yx}] \\ &= f[V(615.0) + w_{yx}] \\ &= 617.53 m \end{aligned}$$

最终取 617.5 m 为汛限水位动态控制的上限值。

3.3 石门水库汛限水位动态控制的下限

根据石门水库的水位-库容曲线、泄流能力曲线等,水库由正常高水位 618.0 m 降至水位 610.0 m,其间库容为 $971 \times 10^4 m^3$ 。当开启 1 个中孔泄水时,只需要 1.2 h;当 6 中孔全开时,只需要 15 min;当上游洪峰流量小于 $3\,000 m^3/s$ 时,6 中孔逐步全开,水库水位亦可迅速降至 610.0 m,因此,石门水库具有较强的泄流能力,对于一般洪水,不需要预泄,仅针对设计及其以上洪水,才需预泄以增大防洪库容。

经调查,石门水库在“19810820”历史大洪水(洪峰流量达 $6\,200 m^3/s$)的调度过程中,曾提前开 6 孔泄水,将水库降低至 607.8 m,最后成功错峰错峰。考虑石门水库的运行年代较长,为避免造成过大的泄洪压力,本次取动态汛限水位的下限值为 610.0 m。

4 汛限水位动态控制的运行判断方式

汛限水位动态控制的运行方式为根据雨洪特性灵活控制起调水位,对大洪水,起调水位应较低,对

一般洪水,起调水位应较高,即针对不同等级的降雨洪水,采用不同的汛限水位与之对应,从而在保障防洪调度安全的同时,尽可能地多蓄水兴利^[15]。因此,实际运行中需要判断确定汛限水位管控方式,并且判断条件需要简便易行、快速准确,具有可操作性。实际工程往往从雨情、水情、库情 3 个方面考虑,本次针对石门水库选用降雨量指标、河道洪水流量指标作为关键指标。

降雨量选用石门坝址以上流域平均降雨量,从强度、雨量等来衡量判断;河道洪水流量则以石门上游马道水文站的预报流量或实测的洪峰流量进行放大延长至坝址处后衡量判断。

石门水库的蓄泄能力分析表明,即使只开两孔中孔,也可在 1.5 h 内将水位由 618.0 m 下泄至 615.0 m;并且只有当遭遇 500 年一遇以上的洪水时,才需要 6 孔中孔并开泄洪,而该频率洪水基本没有发生过。因此,石门水库具有较强的泄洪能力,一般洪水均可考虑适度抬高汛限水位以获取效益;遇大洪水时可提前预泄,降低汛限水位获取大的防洪库容;在两场洪水之间的无雨无洪的平水时段,库水位应当允许处在恰当的高水位运行。

(1)用流域平均降雨量判断。气象部门一般将 6 h 降雨量分为 6 个等级,具体见表 1。

表 1 降雨等级表					mm
无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨
0	0.1 ~ 10	10.1 ~ 25	25.1 ~ 50	50.1 ~ 100	100.1 ~ 200

洪水预报基于气象预报,但较气象预报更复杂、精度低。若以降雨预报作为管控指标,汛限水位的动态控制具体如表 2 所示。

表 2 根据流域降雨控制汛限水位	
流域平均降雨量 P/mm	汛限水位 H/m
$P < 50$	617.5 ~ 617.0
$50 \leq P < 100$	616.0
$100 \leq P < 200$	615.0
$P \geq 200$	615.0 ~ 610.0

(2)用预报的洪峰流量判断。当上游马道站洪水预报达到一定的精度时,也可将预报的洪水流量放大至坝址处,据此进行动态控制,具体判断控制条件如表 3。

表 3 根据入库洪峰流量控制汛限水位	
放大至石门坝址处洪峰流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	汛限水位 H/m
$Q < 1850$	617.5 ~ 617.0
$1850 \leq Q < 2520$	616.0
$2520 \leq Q < 4850$	615.0
$Q \geq 4850$	615.0 ~ 610.0

在表 3 中,对于石门水库,洪峰流量 4 850 m³/s 相当于洪水重现期(N) 为 100 年一遇(即 $N = 100$),洪峰流量 2 520 m³/s 相当于洪水重现期(N) 为 10 年一遇(即 $N = 10$),洪峰流量 1850 m³/s 相当于 5 年一遇(即 $N = 5$)。

5 实例调度

以下以石门水库“20110728”洪水为例,对比固定汛限水位 615.0m 及汛限水位动态控制两种不同的调度方式,对比数据参见表 4。

气象预报:28 日 2:00,汉中气象台发布天气预报:预计 6 h 内会有降雨。

水情:28 日 8:00,石门水库入库流量开始增加。降雨之初,预报降雨量 $P < 50$ mm,所以,控泄流量仍以 40 m³/s 下泄,库水位缓慢上升。

28 日 20:00,石门水库库水位约上升 0.5 m,至 615.5 m,降雨量 $P < 50$ mm,入库洪水流量 106 m³/s,选择汛限水位 617.5 m,水位可继续升高,维持下泄流量不变。

28 日 22:00,石门水库水位上升至 616.0 m。入库流量增加至 343 m³/s。继续选择汛限水位 617.5 m。

28 日 23:00,迎来第 1 个洪峰,洪峰流量 651 m³/s。库水位接近 616.5 m。

29 日 00:00,库水位下降至 616.5 m,监控入库及下泄,保证当前库水位。此时入库流量为 591 m³/s。

29 日 01:00,气象台发布暴雨预警。鉴于当前入库流量已然偏大,再加之暴雨的可能,考虑将汛限水位降至 617.0 m。故加大下泄流量,尽快降低库水位。打开一孔中孔,增加下泄流量。下泄量 840 m³/s。

29 日 04:00 - 06:00,入库流量再次增加,洪峰流量达 1 110 m³/s,增开 1 个中孔泄流,维持库水位 616.0 m。

29 日 06:00,气象台发布未来 24 h 时全市小

雨。虽然降雨即将减小,但河道流量仍处于 1 000 m³/s 以上量级,维持库水位处于当前汛限水位 617.0 m。

29 日 08:00,洪水流量开始明显减小。

29 日 12:00,天气预报有阵雨,未来 24 h 阴转多云,区域降雨量 $P=0$,说明降雨已停,可考虑将库水位抬高。此时入库流量 978 m³/s,拟将汛限水位回升至 617.5 m。

29 日 13:00,库水位蓄至 617.0 m,入库流量减小至 740 m³/s。保持 1 个中孔泄流。

29 日 18:00–20:00,因阵雨发生,入库流量略有增加,最高至 784 m³/s,维持库水位缓慢上升。

表 4 “20110728”洪水实际及汛限水位动态控制模拟调度对比分析表

时间	入库 流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	实际调度		汛限水位动态控制调度	
		下泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	库水位/ m	下泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	库水位/ m
28 日 18:00	119	40		40	
28 日 19:00	120	40	615.05	40	615.05
28 日 20:00	106	160	615.01	40	615.17
28 日 21:00	221	160	615.10	40	615.40
28 日 22:00	343	160	615.22	40	615.75
28 日 23:00	651	840	615.05	40	616.49
29 日 00:00	591	840	614.76	40	617.05
29 日 01:00	550	840	614.46	40	617.75
29 日 02:00	536	840	614.20	840	617.33
29 日 03:00	870	840	614.27	1640	616.48
29 日 04:00	1100	840	614.47	1640	615.83
29 日 05:00	1100	840	614.78	840	616.10
29 日 06:00	1110	840	615.04	840	616.43
29 日 07:00	1040	1640	614.45	840	616.61
29 日 08:00	978	1640	613.50	840	616.77
29 日 09:00	930	840	613.67	840	616.94
29 日 10:00	876	840	613.71	840	616.97
29 日 11:00	800	840	613.66	840	616.94
29 日 12:00	784	840	613.54	840	616.82
29 日 13:00	740	160	614.32	840	616.75
29 日 14:00	712	160	614.86	840	616.57
29 日 15:00	700	160	615.56	160	617.25
29 日 16:00	681	840	615.41	160	617.83
29 日 18:00	726	840	615.25	840	617.71
29 日 19:00	784	840	615.16	840	617.62
29 日 20:00	744	840	615.03	840	617.58
30 日 00:00	667	840	614.73	840	617.33
30 日 02:00	607	840	614.47	840	617.11
30 日 04:00	551	840	614.31	160	617.51

29 日 22:00,降雨完全停止,此时,石门水库库水位已蓄至 617.0 m。

至 30 日 10:00,入库洪水流量已减小至 442 m³/s,库水位蓄至 617.5 m 后敞泄。以此水位为汛限水位上限,保持高水头发电,增加效益。

从表 4 的调度结果可看出,按动态汛限水位控制相比于静态汛限水位明显地抬高了水库水位,增加水库汛期蓄水量,为后期的灌溉、发电、供水等提供保障。

6 结 论

文中考虑综合利用水文气象预报等信息,在确保石门水库防洪安全的前提下,合理调节水库防洪与兴利库容,安全经济地设计汛限水位动态控范围的上下限,即进行水库汛限水位的动态控制,提高水资源利用率,结果表明:当预报降雨量 $P<50$ mm 或预报洪峰流量 $Q<1\,850$ m³/s 时,抬高汛限水位至 617.0~617.5 m,当预报降雨量 $50\text{ mm}\leq P<100$ mm 或预报洪峰流量 $1\,850\text{ m}^3/\text{s}\leq Q<2\,520\text{ m}^3/\text{s}$ 时,抬高汛限水位至 616.0 m,以拦蓄洪尾,增加水库汛期蓄水量,实现洪水资源化;当预报降雨量 $P\geq 200$ mm 或预报洪峰流量 $Q\geq 4\,850\text{ m}^3/\text{s}$ 时,则可降低汛限水位至 610.0 m,增大防洪库容,保证防洪安全。

随着现代科学技术的迅速发展,气象、水文预报日趋成熟,精度越来越高,在水库调度管理中实时考虑预报信息已成为必然趋势,建立一定可接受风险下的汛限水位动态控制模型,定量评价动态控制的效益与风险以扩大洪水效益将是后续研究的重点。

参考文献:

[1] 张改红,周惠成,王本德,等. 水库汛限水位实时动态控制研究及风险分析[J]. 水力发电学报,2009,28(1):51–55.

[2] 叶正伟. 淮河流域洪水资源化的理论与实践探讨[J]. 水文,2007,27(4):15–19.

[3] 刘攀,郭生练,李 玮,等. 隔河岩水库分期汛限水位及风险效益分析[C]//. 中国水利学会 2005 年学术年会论文集—水旱灾害风险管理. 北京:中国水利水电出版社,2005.

[4] 冯 平,韩 松. 提高水库汛限水位的防洪风险分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2007,40(5):525–529.

[5] 冯 平,徐向广,温天福,等. 考虑洪水预报误差的水库防洪控制调度的风险分析[J]. 水力发电学报,2009,28(3):47–51.

(下转第 157 页)

大不断降低,水位漏斗的面积迅速扩大;控采阶段,岩溶水开采量得到控制,降落漏斗面积逐渐减小,漏斗中心水位开始回升;压采/禁采阶段,岩溶水开采量迅速减小,水位降落漏斗面积明显减小,漏斗中心水位显著回升,七里沟水源地漏斗中心水位现已基本回到开采初期水平。

徐州市岩溶水水位降落漏斗形成的主要因素:地表水资源缺乏、供水水源单一,岩溶水开采强烈、储存资源量减少,土地硬化面积增大、入渗补给量减小,矿坑疏干增大岩溶水排泄量。通过对岩溶水开采量、年平均降水量、土地硬化面积与漏斗中心水位进行多元相关分析,结合水位漏斗演变规律,得出岩溶水开采量为岩溶水水位持续下降及漏斗形成与演变的主导因素。

徐州市岩溶水强烈开采引发了岩溶地面塌陷、地裂缝、地下水污染等系列环境地质问题,通过转变地下水管理方式、优化水资源配置、控采岩溶水等措施有效控制水位降落漏斗,有效解决水资源衰竭与岩溶塌陷防控问题。

参考文献:

- [1] 熊彩霞,刘沂轩. 徐州市地面塌陷与岩溶水开采关系研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):80-82.
- [2] 赵厚舜,田颖. 江苏省徐州地区岩溶地下水赋存规律探讨[J]. 地下水,2014,36(6):65-67.
- [3] 韩宝平,周东来,赵林,等. 徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J]. 中国岩溶,1994,13(2):107-115.
- [4] 胡昌林. 徐州市岩溶水开发过程中的环境地质问题[J]. 水文地质工程地质,1998,40(5):36-38+62.
- [5] 黄敬军,张丽,缪世贤. 江苏省地下水开发利用中的环境地质问题及对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,

2014,25(4):101-107.

- [6] 杨丽芝,刘春华,刘中业. 德州深层地下水开采引发地面沉降变化阈值识别[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):55-60.
- [7] 杨丽芝,刘中业,刘春华. 德州深层地下水位漏斗形成主导因素识别与可恢复性研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(6):9-15.
- [8] 孙超,赵文莲,商磊,等. 邯郸市市区地下水水位漏斗演化特征[J]. 地下水,2015,37(1):54-56.
- [9] 费宇红,苗晋祥,张兆吉,等. 华北平原地下水降落漏斗演变及主导因素分析[J]. 资源科学,2009,31(3):394-399.
- [10] 刘沂轩,熊彩霞. 徐州丰沛平原区深层地下水降落漏斗演变特征及成因机理研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2014,35(5):13-15.
- [11] 郭飞,刘建立,朱学愚. 徐州地区裂隙岩溶水资源问题研究[J]. 中国岩溶,2002,21(4):263-268.
- [12] 贾晓娟,韩宝平. 北西向断裂对徐州市岩溶水的控制作用[J]. 煤炭科技,1996(4):25-26.
- [13] 陈丁,张景发,朱鲁,等. 徐州废黄河断裂带的空间展布与活动性研究[J]. 地震地质,2011,33(1):67-78.
- [14] 胡昌林,曹志猛,陈国富,等. 江苏省徐州市城市供水水文地质勘察报告[R]. 江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队. 1985.
- [15] 杨士弘. 城市生态环境学[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [16] 薛丽芳,谭海樵,孔祥光. 基于水安全的徐州城市发展策略[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(5):516-522.
- [17] 梁永平,王维泰,赵春红,等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶,2013,32(1):34-42.
- [18] 许爱芹,刘喜坤. 快速城市化条件下地下水开发的环境效应研究[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版),2008,26(1):68-71.

(上接第150页)

- [6] 邓辉,王克彬. 万家寨水库汛期防洪调度风险分析[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):61-64.
- [7] 袁晶瑄,王本德,田力. 白龟山水库防洪预报调度方式研究及风险分析[J]. 水力发电学报,2010,29(2):132-138.
- [8] 何晓燕,黄金池. 对水库汛限水位动态控制风险分析的认识[J]. 大坝与安全,2010,22(6):27-30.
- [9] 王本德,周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [10] 朱永英,袁晶瑄,王国利,等. 实时预蓄预泄法汛限水位动态控制与应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(4):606-609.

- [11] 郑雄波,李华穗,刘雪玉. 基于泄量约束法的汛限水位动态控制[J]. 水电自动化与大坝监测,2011,35(6):70-73.
- [12] 贺平,刘松. 丹江口水库汛限水位动态控制的可行性研究[J]. 人民长江,2012,43(2):36-38.
- [13] 李旭光,王本德. 基于洪水预报调度方式的汛限水位设计方法探讨[J]. 水力发电学报,2009,28(3):52-56.
- [14] 贵阳勘测设计研究院有限公司. 陕西汉中石门水库除险加固工程初步设计报告[R]. 2015,11.
- [15] 王义民,吴成国,李程,等. 基于不同预泄调度模式的喜河水库汛限水位动态控制研究[J]. 水力发电学报,2011,30(2):26-31.