

①
64-68

填埋场复合衬垫系统

钱学德 郭志平

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

X705

城市固体废物填埋场是控制固体废弃物堆填物的一种方法,其填埋地点必须能防止地下水污染,有利废气排放,并有一个淋洗液收集和能对场周围的地下水和气体进行监测。现代卫生填埋场主要由衬垫系统、淋洗液收集和排放系统、气体收集和封顶系统组成^[1]。

衬垫系统位于填埋场底部和四周侧面,是一种水力隔离措施,用来将固体废弃物和周围环境隔开以避免废弃物污染周围的土地和地下水。图1是一个简单的城市固体废物填埋场构造示意图。

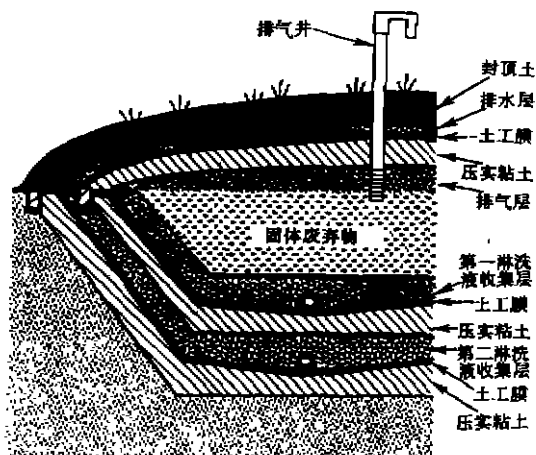


图1 城市固体废物填埋场构造示意图

1 填埋场衬垫系统的沿革

填埋场所有系统中最关键的部位是衬垫或衬垫系统。随着工程技术的发展,用于固体废物填埋场的衬垫系统也在不断改进。在美国,1982年前主要使用单层粘土衬垫(见图2a),1982年开始使用单层土工膜衬垫(见图2b),1983年改用双层土工膜衬垫(见图2c),1984年又改用单层复合衬垫(见图

2d),1987年后则广泛使用带有两层淋洗液收集系统的双层复合衬垫(见图2e)。

压实粘土衬垫广泛用于划分填埋单元和拦蓄废弃物,覆盖新的填埋废弃物和封闭老的填埋场。作为基底衬垫,压实粘土必须达到一定标准以防止地下水被淋洗液污染。粘土衬垫至少为60cm厚的压实粘土层,其透水性应低于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,并具有足够的强度。填埋场粘土衬垫的设计和施工步骤已在本讲座(4)中讨论过,其要点有:选择合适的土料;进行击实试验找出 $w \sim \rho_d$ 关系;注意打碎土块;指导适当压实;消除压实土层界面及防止干燥等^[2-3]。

2 土工膜

土工膜是填埋工程中最常用的三种土工合成材料之一(另两种为土工网和土工织物),是一种基本不透水的连续的聚合物薄膜。它也不是绝对不透水,但和土工织物或普通的土甚至粘性土相比,其透水性极小。通过水汽渗透试验测得其渗透系数约为 $0.5 \times 10^{-10} \sim 0.5 \times 10^{-13} \text{ cm/s}$,因此,它经常被用作液体或水汽的隔离物^[3]。

2.1 土工膜的种类

土工膜由一种或多种聚合物构成,其中也可添加如碳黑、色素、填料、增塑剂、交联化学制品、防老化剂及生物制剂等其它成分。用于制造土工膜的主要的聚合材料有:①热塑塑料,如聚氯乙烯(PVC);②结晶状热塑塑料,如高密度聚乙烯(HDPE)、超低密度聚乙烯(VLDPE)、线性低密度聚乙烯(LLDPE)等;③热塑合成橡胶,如氯化聚乙烯(CPE)和氯化磺胺聚乙烯(CSPE)等。常用于土工膜的聚合材料为HDPE、PVC、CSPE及CPE。土工膜的厚度可由0.5mm至3mm不等,除HDPE外,其它土工膜的厚度可取0.75mm左右,HDPE土工膜的厚度则至少取1.5mm,以满足焊接接

作者简介:钱学德,男,博士,旅美学者,美国密歇根州环保署官员、河海大学兼职教授,从事环境土工研究。

郭志平,男,教授,从事岩土工程研究,曾发表《土工原理与计算》等论著。

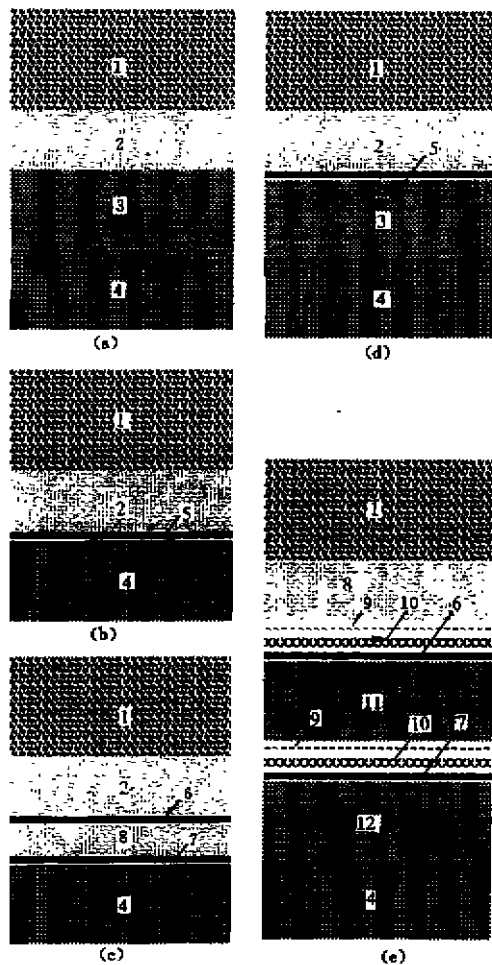


图2 衬垫系统示意

(a)单层粘土衬垫;(b)单层土工膜衬垫;(c)双层土工膜衬垫;(d)单层复合衬垫;(e)双层复合衬垫

1.固体废弃物;2.砂质排水及保护层;3.压实粘土衬垫;4.底土;5.土工膜衬垫;6.第一层土工膜;7.第二层土工膜;8.砂质保护层;9.土工织物反滤层;10.土工网排水层;11.第一层粘土衬垫;12.第二层粘土衬垫

头的需要。有的土工膜在制造时和钢筋网放在一起碾压,表面形成波纹状或格栅状,这样可以提高抗拉强度和尺寸稳定性,美国人称作斯克林(Scrim,相当于中国的格子布)。

2.2 HDPE 土工膜

在填埋场衬垫系统中使用最广泛的土工膜是HDPE。HDPE 土工膜不仅在用作为填埋场衬垫时表现出优良的耐久性能,而且也适用于污水池衬垫、废水处理设施、渠道或水池的衬砌、移动覆盖等。

HDPE 土工膜是在平板挤压机上用高分子加密聚乙烯制成的,其厚度有1.0,1.25,1.5,2.0,2.5 mm等几种,它具有下列特征和优点:①抗化学腐蚀能力强,一般来说,抗化学腐蚀能力是衬垫设计中最需要

注意的,而HDPE是所有土工膜中抗化学能力最强的一种,填埋场淋洗液并不会对由HDPE组成的衬垫造成危害;②透水性低,HDPE的低透水性可保证地下水不进入衬垫,雨水不渗入封顶,甲烷(沼气)不会从气体排放系统中逸出;③抗紫外线能力强,各土工膜中HDPE对紫外线老化的抵抗能力最强,添加碳黑可增强对紫外线的防护,而且由于在HDPE土工膜中不允许添加增塑剂,因此不必担心由于紫外线照射而引起增塑剂的挥发。

2.3 波纹面土工膜

把土工膜表面压成粗糙的波纹状或格栅状的方法,现已得到很快推广。特殊的波纹状或格栅状表面可以增加衬垫与土体、土工织物及其它土工合成材料之间的密合程度而使边坡稳定性得到改善。覆盖在衬垫上的土体因底部摩擦增加而不易滑动,使各种陡峭边坡的稳定安全系数提高。表1给出通过直剪试验求得的波纹面土工膜和各种材料接触面上的摩擦角和凝聚力。任何一种聚乙烯土工膜的一面或两面均可加工成粗糙的外壳,但波纹面土工膜的四边均应留15~25 cm的光滑段以方便焊接,在铺设前要光滑段核心的厚度及强度进行快速检验。

表1 波纹面土工膜与材料接触面上的最大摩擦参数

土工膜接触的材料	摩擦角	凝聚力/kPa
排水砂层	37°	1.20
粘土	29°	7.20
无纺土工织物	32°	2.64

3 复合衬垫系统

复合衬垫由土工膜和一层低透水的粘土紧密接触而成,它已广泛用于危险品填埋场和城市固体废物填埋场。

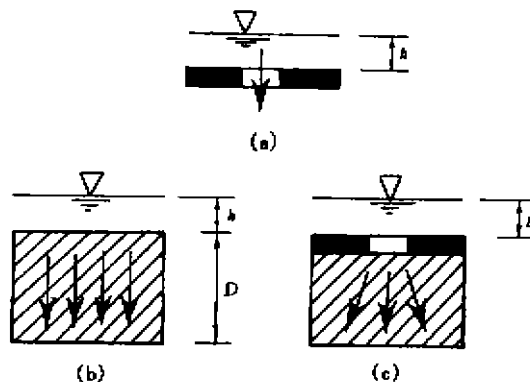


图3 经过土、土工膜和复合衬垫的渗流模式

(a)土工膜衬垫,通过缺陷的快速渗流;(b)土质衬垫,通过整个衬垫的渗流;(c)复合衬垫,通过微小面积的渗流

复合衬垫可克服单层土工膜衬垫存在的缺陷。图3表示复合衬垫与单一的土工膜或粘土衬垫的比

较。如果土工膜上有一个孔洞或接缝处有缺陷,同时底土透水性又很强,则液体极易经孔洞或接缝向下流出。至于无土工膜的压实粘土衬垫,虽然单位面积上的渗流不大,但渗流却是在整个衬垫面上都会发生的。而对于复合衬垫,虽然液体仍易从土工膜的孔洞中流出,但接着遇到的是低透水性的粘土层,可阻止液体进一步向下渗透,因此,可以通过在土工膜下设置低透水土层而将经过土工膜孔洞的渗流量减至最小。同样,经过粘土衬垫的渗流将因其上盖有紧密接触的土工膜而减少,因为尽管土工膜上存在孔洞或在接触处有缺陷,经过其下粘土衬垫的渗流面积仍将大幅度减小,从而大大减少通过粘土衬垫的渗流量^[4]。

在美国,按照最新的环保法要求,在城市固体废物填埋场中广泛使用了带有主、次两层淋洗液收集系统的双层复合衬垫。如图 2e 所示,双层复合衬垫从底到顶由下列部分组成:至少 3 m 厚的天然粘土基底或 90 cm 厚次层(第二层)压实粘土衬垫;第二层柔性薄膜衬垫;次层淋洗液收集系统;90 cm 厚主层(第一层)压实粘土衬垫;第一层柔性薄膜衬垫;主层淋洗液收集系统;顶部是 60 cm 厚的砂质保护层。淋洗液收集系统由一层土工网和土工织物构成,基底及压实粘土衬垫的渗透系数必须小于或等于 1×10^{-7} cm/s。

4 通过衬垫的渗流量

渗流量是指根据设计条件定出的淋洗液排放体积。其数量应根据同样设计类型已建设施的经验,特别是渗流监测系统的资料加以分析确定。如果没有可利用的现成资料,也可以用以下较保守的分析方法来评估预期产生的渗流量。图 3 表示三种类型的衬垫系统,即:低透水压实粘土衬垫、土工膜衬垫和土工膜与压实粘土紧密结合的复合衬垫。图上画出了通过这三种衬垫的不同渗流情况,以对三者不同的隔离效果进行比较。

4.1 通过压实粘土衬垫的渗流量

通过压实粘土衬垫的渗流量可用达西定律计算。

$$Q = k_i A \quad (1)$$

式中 Q 为通过衬垫的渗流量, cm^3/s ; k_i 为压实粘土的渗透系数, cm/s ; i 为水力梯度, A 为渗流通过的截面积, cm^2 。如果土是饱和的,且土中无吸力,则水力梯度 i 为

$$i = (h + D)/D \quad (2)$$

式中 h 为衬垫上淋洗液的水头(见图 3); D 为粘土衬垫的厚度。

4.2 通过土工膜衬垫的渗流量

假定土工膜衬垫上有好几个孔洞(或接缝缺

陷),而且这些孔洞彼此相距甚远,对通过每一孔洞的渗流量彼此没有影响,积聚在衬垫上的淋洗液水头 h 是个常量,同时土工膜下的土层透水性很强,对通过土工膜孔洞的渗流没有妨碍。若孔洞的尺寸和形状已知,则通过土工膜上每一孔洞的渗流量可用伯诺利方程求出。

$$Q = C_s a (2gh)^{0.5} \quad (3)$$

式中 Q 为通过土工膜每一孔洞的渗流量, cm^3/s ; C_s 为流量系数,对于圆孔可近似取 0.6; a 为孔洞面积, cm^2 ; g 为重力加速度,取 $981 \text{ cm}/\text{s}^2$; h 为衬垫上积累的淋洗液水头。

4.3 通过复合衬垫的渗流量

通过复合衬垫的渗流是液体经土工膜孔洞或缺陷流出并通过其下低透水粘土层渗透产生的,所积聚的液体大部分集中于填埋场复合衬垫土工膜的两边。若土工膜上存在缺陷(孔洞或接缝),液体首先通过土工膜缺陷流出,然后经土工膜和土层之间的间隙,最后进入低透水性土层,如图 4 所示。在土工膜和低透水性土的间隙内流动的水流称作界面流,被界面流覆盖的面积称作浸水面积,假定渗流在土中的流向是竖直的,浸水面积的半径为 R 。

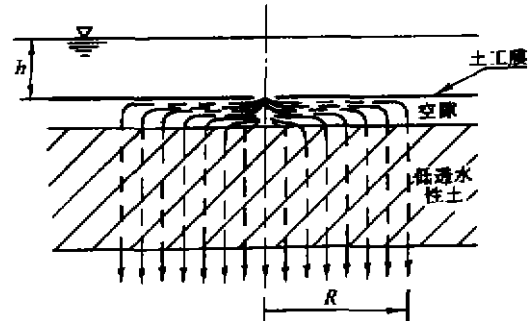


图 4 经过复合衬垫的水流

复合衬垫两部分(即土工膜和低透水土层)之间接触的紧密程度是控制复合衬垫渗流量的关键因素,因为浸水面积的半径 R 是由它控制的。接触条件的优劣可这样来定义^[5]:紧密接触是指土工膜的折皱极少且其下低透水土层已被适当压实并具有光滑的表面;接触不良则表示土工膜折皱较多且其下低透水土未被很好压实,表面又较粗糙。此外,影响复合衬垫渗流量的因素还有土工膜上缺陷的数量和大小,其下低透水土的渗透系数和其上积聚液体的水头。

经过分析研究与模型试验,已得到计算通过复合衬垫土工膜上每一圆孔渗流量的经验公式^[6,7]。

接触条件紧密

$$Q = 0.21 a^{0.1} h^{0.9} k_i^{0.74} \quad (4)$$

接触条件不良

$$Q = 1.15 a^{0.1} h^{0.9} k_t^{0.74} \quad (5)$$

式中 Q 为通过复合衬垫土工膜上每一圆孔的渗流量, m^3/s ; a 为圆孔面积, m^2 ; h 为土工膜上液体水头, m ; k_t 为复合衬垫低透水性土层的渗透系数, m/s 。

5 三种不同类型衬垫的比较

表2列出三种不同类型衬垫在各种假定条件下渗漏量的比较, 每种衬垫质量均分成优、良、差三个等级。美国联邦环保局(USEPA)要求无论是危险品填埋场或是城市固体废弃物填埋场, 其低透水压实粘土衬垫的渗透系数均不得大于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$ 。在表2中将 $k_t = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$ 的粘土衬垫质量等级定为“良”, k_t 高出其一个数量级的衬垫质量定为“差”, k_t 低于其一个数量级的衬垫质量定为“优”。

表2 三类衬垫每英亩^①面积上的计算渗流量^[8]

衬垫类型	质量等级	关键参数假定值	渗流量 $Q/\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$
压实粘土	差	$k_t = 1 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{s}$	4542.5
土工膜	差	每英亩 ^① 30个孔, $a = 0.1 \text{ cm}^2$	37854.0
复合衬垫	差	$k_t = 1 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{s}$ 每英亩 ^① 30个孔, $a = 0.1 \text{ cm}^2$	378.5
压实粘土	良	$k_t = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$	454.3
土工膜	良	每英亩 ^① 1个孔, $a = 1 \text{ cm}^2$	12491.8
复合衬垫	良	$k_t = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{s}$ 每英亩 ^① 1个孔, $a = 1 \text{ cm}^2$	3.0
压实粘土	优	$k_t = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}/\text{s}$	45.4
土工膜	优	每英亩 ^① 1个孔, $a = 0.1 \text{ cm}^2$	1249.2
复合衬垫	优	$k_t = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}/\text{s}$ 每英亩 ^① 1个孔, $a = 0.1 \text{ cm}^2$	0.38

注: ①1英亩 = 4047 m^2 。

表2中所有复合衬垫的渗流量均按土工膜和粘土衬垫之间的接触条件为不良求出的。表2表明, 复合衬垫的工作性能大大优于单层压实粘土衬垫及单层土工膜衬垫, 即使它的施工质量只能达到较差或中等水平。

为了提高复合衬垫的防渗效果, 土工膜必须与下卧的低透水土层实现良好的水力接触(通常叫作紧密接触)^[4]。如图5a所示, 复合衬垫必须设法限制土中的水流只能在很小的面积内流动, 且不允许液体沿土工膜和土的界面发生侧向蔓延。为保证实现良好的水力接触, 粘土衬垫在铺设土工膜之前要用钢筒碾压机压平曝光, 而覆盖土工膜时, 要尽可能使折皱减至最少。另外, 在土工膜和低透水土层之间不应再铺设高透水材料如砂垫层或土工织物等, 因为这样将破坏低透水性土与土工膜的复合效果, 如图5b所示。

如果担心土料中的石子会造成土工膜穿孔, 则应将石子剔除, 或在含石子的土料上铺一层低透水

粘土, 也可在填筑前用振动筛将石子筛掉, 也可使用其它可将石子筛掉或能将其压入松土层中的机械设备。经过处理过的含石子很少或石子很小的土料, 在施工时应置于土质衬垫的顶层作为与土工膜直接接触的基底。

图6给出通过现场试验分别从压实粘土衬垫和复合衬垫下收集到的渗流量。两填埋单元位于同一地点, 面积相同, 但一个单元的主要衬垫为压实粘土, 另一则为复合衬垫, 两个单元填埋方式相同, 堆填的固体废弃物体积也一样。从图中可明显看出, 复合衬垫下的渗流量要比压实粘土衬垫少得多。

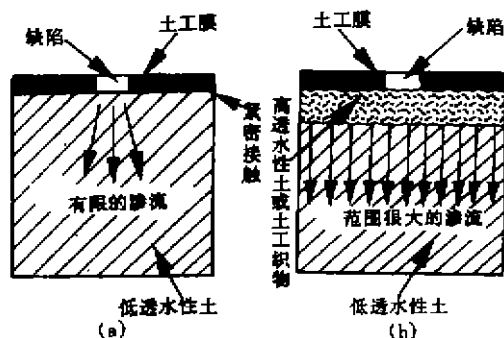


图5 复合衬垫的紧密水力接触
(a)优选推荐;(b)不宜采用

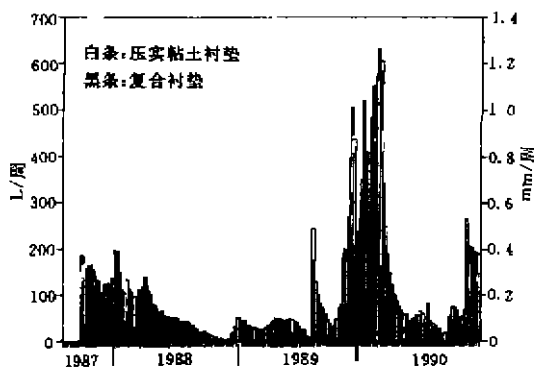


图6 粘土衬垫和复合衬垫渗流量比较^[9]

参考文献

- 1 钱学德, 郭志平. 美国的现代卫生填埋工程. 水利水电科技进展, 1995, 15(5): 8~12; 15(6): 27~31
- 2 钱学德, 郭志平. 填埋场粘土衬垫的设计与施工. 水利水电科技进展, 1997, 17(4): 55~59
- 3 Qian Xuede. Geotechnical aspects on landfill design. The University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, Michigan, USA, May 1995
- 4 Daniel D E. Landfill and impoundments. In: David E Daniel ed. Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapter 5. Chapman & Hall, USA 1993. 97~112
- 5 Bonaparte R, et al. Rates of leakage through landfill liners. In: Proceedings of Geosynthetic '89, Vol. I, IFAI, St. Paul Minnesota, 1989. 18~29

- 6 Giroud J P, et al. Leakage through liners constructed with geomembranes (part II), composite liners. In: Geotextiles and Geomembranes, Vol 8. England: Elsevier Science Publishers Ltd, 1989. 71 ~ 111
- 7 Giroud J P. Evaluation of leakage through composite liners. In: Geotextiles and Geomembranes, Vol 8. England: Elsevier Science Publishers Ltd, 1989. 337 ~ 340
- 8 USEPA. Design and construction of RCRA/CERCLA final cov-

ers. EPA/625/4-91/025, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Washington D C, May 1991

- 9 Melchior S, et al. Hydrological studies on the effectiveness of different multilayered landfill caps. In: Christensen T H, et al eds. Landfilling of Waste: Barriers, London: E&FN Spon, 1994. 115 ~ 137

(本讲座完)

(收稿日期: 1997-07-28 编辑: 马敏峰)

(上接第 58 页)

c. 70 年代引蓄水取得了显著成绩, 但后期马武营平原水库可行性研究不当, 建成后, 一直不能蓄水, 造成了巨大的人力物力的浪费。

1972 年华北平原大旱, 在掀起打井热潮的同时, 引蓄水工作抓出了明显的成效。从 1972 年秋季开始有计划有组织地引蓄地上水, 到第二年春天引水 1800 万 m^3 。1973 年以后, 引蓄水逐年增多, 到 1979 年秋季引蓄水已经形成规模, 1979 年秋季至第二年春季引蓄水高达 11.01 亿 m^3 , 是 1972 年以来引蓄水最多的一年。但 1977 年、1979 年清南地区遇大涝, 文安洼被淹, 1977 年来水达 8.3 亿 m^3 , 水被排干不久, 又被春旱、夏旱、秋旱困扰, 于是在文安洼洼底兴建了一个马武营蓄水区。建一临时抽水机站 (4 个流量) 向蓄水区內抽水, 设计蓄水量 3000 万 m^3 。要使蓄水区达到设计蓄水量, 需要近 100 天的时间, 然而从实际情况看, 这是不可能的。因此, 马武营蓄水区建成已经 15 年了, 没有一年蓄上水, 尽管文安洼淹了地, 大清河弃水入海, 马武营蓄水区也无可靠的措施蓄水。事与愿违的教训是深刻的。

d. 进入 90 年代, 水资源短缺的局面更加严重, 大量超采地下水的结果, 使地下水位急剧下降。一些同志又认为搞节水是杯水车薪, 认为靠引过境的地上水是解决水资源危机的根本出路, 要求水利工作以蓄水为重点, 所有闸涵一律闭闸迎汛蓄水, 打破蓄水上的清规戒律。在“蓄水有啥科学要讲”的思潮影响下, 从实践中总结出来的科学蓄水的一些作法被当作清规戒律革除, 违背科学规律造成了人为的严重后果。

1994 年 7 月 12 ~ 13 日, 沟河上游普降大暴雨, 最大降雨量 415 mm, 鲍邱河洪水猛涨, 按照上级主管局的意见, 大厂县境内的鲍邱河的几座河道节制闸从上汛起就闭闸迎汛蓄水。这几座节制闸都是县管闸, 提闸设备是人工机械, 不仅费力而且提闸速度很慢。7 月 12 日发生暴雨后, 连夜派人到现场提闸, 由于水势过猛, 闸板水压过大, 人工提闸设备提不动闸门, 水难以下泄, 洪水上漲加快, 很快水漫闸顶而下, 漫过闸两侧下泄, 人为地提高了鲍、邱河水位, 而刘庄闸和鲁庄闸决口, 更加剧了水害。

40 年蓄水正反两方面的经验教训, 反映了华北平原水利的自身特点: 多种要素相互依存, 相互作用, 相互转化。洪、涝、旱、碱四大灾害是在一定的条件下相互转化引起的不良后果。蓄水是为了抗旱, 违背了规律就形成涝灾或碱化土地。而按规律办事就能避免涝灾和碱化土地, 达到抗旱的目的。

2 平原蓄水应注意的问题

华北平原引蓄地上水是解决水资源短缺的重要措施, 是发展国民经济之必需, 必须认认真真地搞好, 争取多蓄水, 保安全。

a. 在指导思想上要克服怕蓄水、怕担风险和不敢蓄水、少蓄水的无所作为的思想, 树立敢于蓄水和保安全的观念, 坚持科学蓄水。

b. 市、区、县、乡镇都要制订科学合理的蓄水实施方案, 对蓄水量、蓄水水位、蓄水时机、水调度做好妥善的安排。要做到: ①科学地确定一次最大蓄水量。经验证明, “以蓄水为主, 节节控制”是一个失误。②科学地研究闸、河、渠、塘的最高蓄水位。大中型闸涵要以规划设计确定的水位为准。一般渠道、坑塘最高蓄水位以低于地面 1 m 为宜, 超量来水要及时排出, 防止长期超量蓄水产生土地再生性盐碱化, 防止再来水时排水不及时形成涝灾。③一定要正确地把握蓄水时机。就全汛期而言, 除了条件好的大中型闸涵可以上汛就蓄水外, 一般的闸涵、河、渠、坑塘都不能上汛就蓄水。华北大汛期在 7 月下旬至 8 月上旬, 一般在 8 月上旬开始蓄水, 8 月下旬和 9 月份集中力量狠抓蓄水。就一次洪峰而言, 要把洪峰前的洪水放过去, 再按排闭闸蓄水。④搞好调度, 做到引得进、蓄得上、蓄得住、排得出。⑤行洪河道、排沥渠道 (干、支、斗、毛) 都不得蓄水打坝。

c. 一切蓄水工程都要有可行性研究, 工程必须做到能引、能蓄、能排, 对大型平原水库的建设还要研究防止土地再生性盐碱化的措施。坑塘建设要规范化, 一般蓄水深不低于 4 ~ 5 m, 也要能蓄、能排。

d. 市、区、县都要建立蓄水领导小组, 统一指挥蓄水工作。要有一支认真负责, 精通蓄水技术的水调度队伍, 及时掌握情况, 进行科学调度, 确保多蓄水, 保安全。

(收稿日期: 1996-08-26 编辑: 熊水斌)