

堤坝渗漏探测的示踪方法 理论研究与应用

樊哲超 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

学术著作出版资助

漏探测的示踪方法 理论研究与工程应用

樊哲超 著

东北大学出版社
· 沈 阳 ·

© 樊哲超 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

堤坝渗漏探测的示踪方法理论研究与工程应用 / 樊哲超著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2016.5

ISBN 978-7-5517-1271-2

I. ①堤… II. ①樊… III. ①堤坝—水库渗漏—示踪法—探测技术—研究 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 103547 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331 (市场部) 83680267 (社务部)

传真: 024-83680180 (市场部) 83687332 (社务部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 165mm×240mm

印 张: 11.75

字 数: 193 千字

出版时间: 2016 年 5 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 5 月第 1 次印刷

组稿编辑: 周文婷

责任编辑: 潘佳宁

封面设计: 刘江旻

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1271-2

定 价: 36.00 元

前 言

我国现有 26.5 万 km 的防洪大堤，近 8.6 万座水库大坝，矿冶部门还有许多尾矿库坝和废水库坝。国内大量的统计资料表明：由于渗漏问题而造成土石坝失事的约占全部失事事故的 30% 以上。渗漏不仅使水漏失，甚至使水库漏空，还严重危害坝的稳定性，给人民生命财产造成极大损失，因此大坝渗漏问题一直以来得到有关各方的高度重视。尤其是 1998 年流域性大洪水后，全国上下掀起了以高新技术为特点的水利建设和理论研究，国务院启动了 98·8 防灾减灾项目，并明确指示水利科技界，要加强技术创新，发展高科技，查找堤防隐患，确保安全。水利部和防汛办曾在湖南宜阳开展了以渗漏检测为主题的全国堤坝渗漏探测大比武，还开展了以水利量测新技术为中心的全国性学术会议。

西方国家在防洪堤坝建设上的投入大，堤坝质量高，多为混凝土结构，隐患小，一般没有大的渗漏，因此在渗漏探测技术和设备研制上存在不足。国内探测渗漏的方法基本上都是基于地球物理勘探手段，但由于地球物理探测是一种间接勘探方法，其基本原理和方法在理论上没有大的突破，每一种方法都有其条件性、局限性和多解性，特别是在渗漏通道埋深大而空间尺寸相对较小的渗漏通道探查方面显得无能为力。

本书就是在这样的背景下，应用基于地下水流场、化学场、温度场等的现代示踪技术研究堤坝渗漏问题，主要的创新性工作如下。

1. 讨论了测温仪器的种类和精度，及钻孔温度的影响因素和除地下水活动外的其他因素的消除校正方法。介绍了线热源作用对地层温度的热源函数。将堤坝集中渗漏通道中的渗漏水流概化为持续线热源，在前人研究的基础上基于热传导的热源法，建立集中渗漏通道的持续线热源模型，改进了边界条件，推导出新的计算水平渗速公式。在工程实例中，应用钻孔测温资料，用推导出的新公式计算出的渗透流速比前人公

式更加合理，与放射性同位素示踪方法测出的渗速基本一致。

2. 由于单孔中计算水平渗漏流速的传统的点稀释公式和前人推导的广义示踪稀释公式存在着问题和不足，在钻孔中存在垂向流的情况下，在合理的物理模型的基础上，考虑了渗透流速是示踪剂稀释时间的函数，重新推导了示踪方法测流速的稀释公式。通过3个公式的实例计算比较和误差分析，在钻孔中存在垂向流干扰时，含水层上下垂向流速差得越大，新推导的公式与传统点稀释公式计算出的渗透流速的相对误差也越大，这一点与实际情况相吻合，因此新公式的计算结果更加可信。并对国内外同位素测流速示踪仪进行了论述和讨论。

3. 利用稳定同位素、水化学的方法研究堤防渗漏，是一种十分有效的方法。但是人们大多只是定性分析判断。本书尝试将稳定同位素和水化学值作为特征指标值，并根据在实际判断中的参数重要程度的不同赋予不同的权重，应用模糊聚类的方法进行聚类分析，在北江大堤石角段的渗漏探测和高水河堤防渗漏探测的两个工程实例中，其聚类结果与稳定同位素和水化学的定性分析结论一致。

4. 将综合示踪方法应用到小浪底左坝肩渗漏调查中，通过在不同季节多次测量左坝肩的排水洞各排水孔中的排水的温度电导率，测定绕坝观测孔中的地下水的流速流向、温度电导率，并在观测孔中和各排水洞中排水较大的排水孔中取样，分析环境同位素和水化学值，而且在各观测孔间和观测孔与排水洞间进行连通试验，最后查清了小浪底左坝肩各排水洞的排水来源。

本书得到重庆三峡学院学术著作出版基金、国家自然科学基金“无限深透水地基上土石坝及坝基渗流非线性问题建模理论研究”(51309262)资助。

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究意义	1
1.1.1 电法勘探技术	2
1.1.2 CT技术	2
1.1.3 探地雷达技术	2
1.2 综合示踪方法的门类	4
1.3 天然示踪理论基础及目前研究动态	5
1.3.1 温度电导率示踪	6
1.3.2 水文地球化学	13
1.3.3 环境同位素示踪	17
1.4 人工示踪理论基础及目前研究动态	21
1.4.1 利用人工放射性同位素测定地下水水平渗透流速	22
1.4.2 利用人工放射性同位素测定地下水流向	23
1.4.3 利用人工放射性同位素测定地下水垂向流	24
1.4.4 连通试验	29
1.5 本书所做的工作	30
第2章 基于热传导理论的热源法研究堤坝渗漏	32
2.1 钻孔中温度的测量	32
2.2 钻孔温度影响因素	33
2.2.1 地表温度状况	33
2.2.2 地下水运动的影响	34
2.2.3 岩石热物理性质的影响	36
2.2.4 局部热源热效应的影响	36
2.2.5 钻探对测温的影响	36

2.2.6 地形起伏与高程影响	36
2.2.7 地表植被的影响	38
2.3 热源类型	38
2.3.1 体热源	38
2.3.2 面热源	38
2.3.3 线热源	39
2.3.4 点热源	39
2.4 线热源函数	39
2.4.1 瞬时线热源	39
2.4.2 持续线热源	41
2.5 堤坝渗漏的线热源模型	41
2.5.1 热源强度的确定	43
2.5.2 热源强度的确定的讨论	45
2.5.3 参数 β 的求解	47
2.6 工程实例	50
2.7 本章小结	56
第3章 孔中示踪法测定渗透流速流向原理和方法	57
3.1 单孔点稀释模型	57
3.2 流场畸变的校正系数 α	59
3.3 点稀释法的局限性	63
3.4 广义示踪稀释公式的推导	65
3.5 孔中示踪稀释测流速公式的再讨论	68
3.6 垂向流的求解	69
3.7 工程实例分析	71
3.8 国内外同位素示踪仪的研制情况	74
3.9 陈建生研制的同位素示踪仪	79
3.9.1 地下水同位素示踪仪探头的设计	80
3.9.2 投源设计	80
3.9.3 探测部件	81
3.9.4 孔中定位	81

3.10 现场试验平台设计	83
3.11 本章小结	84
第4章 堤坝渗漏分析的模糊聚类模型研究	86
4.1 普通集合和模糊集合	86
4.2 模糊模式识别	87
4.2.1 两个模糊集之间的距离	87
4.2.2 贴近度	88
4.2.3 模糊模式识别的方法	89
4.3 模糊聚类模型	90
4.3.1 层次分析法确定权重向量	93
4.3.2 模糊聚类计算步骤	94
4.4 工程实例	96
4.4.1 北江大堤石角段渗漏通道探测	96
4.4.2 高水河堤防渗漏情况探测	107
4.5 本章小结	114
第5章 示踪法工程应用实例	115
5.1 韶关电厂濠湮灰场漏水路径探测	115
5.1.1 工程概况	115
5.1.2 示踪分析	115
5.1.3 结论	123
5.2 赵家寨煤矿风井地带水文地质条件示踪研究	124
5.2.1 引言	124
5.2.2 示踪法原理	124
5.2.3 赵家寨煤矿风井地带水文地质条件分析	125
5.2.4 结论	128
5.3 水布垭左坝肩渗漏示踪方法研究	128
5.3.1 示踪方法概述	130
5.3.2 水布垭左坝肩渗漏通道和岩溶发育区探测	131
5.3.3 结论	136
5.4 本章小结	137

第6章 综合示踪法在小浪底左坝肩渗漏探测中的应用	138
6.1 小浪底左坝肩工程地质、水文地质条件及渗漏情况	138
6.1.1 工程地质、水文地质条件	138
6.1.2 左坝肩渗漏情况	140
6.2 综合示踪试验方法	144
6.3 当地降雨同位素和水化学分析	145
6.4 4#、28#排水洞排水来源分析	149
6.5 30#排水洞排水来源分析	150
6.5.1 30#排水洞北侧排水来源的天然示踪分析	154
6.5.2 30#排水洞北侧排水来源的人工示踪分析	156
6.5.3 左坝肩绕坝渗漏的连通试验证实	156
6.5.4 30#排水洞其他侧主要排水的示踪分析	159
6.6 2#排水洞排水孔排水来源分析	162
6.7 本章小结	164
第7章 总结与展望	167
7.1 本书的主要研究成果	167
7.2 有待进一步研究的问题	168
参考文献	169

第1章 绪 论

1.1 研究意义

我国现有 26.5 万 km 的防洪大堤, 近 8.6 万座水库大坝, 矿冶部门还有许多尾矿库坝和废水库坝。这些堤防及水库在国民经济及社会发展中产生了巨大的社会、经济和环境效益。但因受当时技术、经济和环境条件的限制, 加之已运行数十年, 大坝的老化是不可避免的, 加之一些大坝的建造条件十分复杂, 有的在设计施工中就遗留下某些缺陷, 导致这些水利工程不同程度地存在一些隐患, 在洪水期间极易形成渗水、管涌等险情。国内大量的统计资料表明: 由于渗漏问题而造成土石坝失事的约占全部失事事故的 30% 以上^[1]。1995 年国际大坝委员会从 111 个失事的土石坝的统计资料显示: 因渗流和侵蚀造成失事的占到 35%^[2]。例如, 西班牙的蒙特哈水库, 建成后, 库水从石灰岩溶洞中漏失, 72m 的大坝耸立在干枯的河谷中^[3]。渗漏不仅使水漏失, 甚至使水库漏空, 还严重危害坝的稳定性, 给人民生命财产带来巨大的威胁和损失。1976 年美国提堂坝 (Teton) 的溃决造成 780km² 的地区受灾, 14 人死亡, 25000 人无家可归。事后大量的调查研究表明, 大量张开节理, 尤其是右坝肩上部, 是大坝失事的主要因素, 右坝肩键槽内的填土由于不均匀沉陷和水力劈裂而导致开裂, 形成了通过粉土料的初始渗流, 逐渐形成管涌, 终致溃决, 这是失事的最可能机理^[4]。

坝区的渗漏, 分为坝基渗漏、坝体渗漏和绕坝渗漏等。这些渗漏的后果, 一方面造成水库水量损失, 甚至干库, 使水库失去效益; 还由于这种渗漏对坝基造成向上顶托的扬压力, 影响大坝的稳定安全; 另一方面, 如果坝基岩 (土) 体存在着颗粒不均匀的松散粒状结构土体, 或岩体内存在着破碎岩屑夹泥 (如层间错动破碎夹层、未胶结的断层破碎带、岩溶洞隙的泥质充填物等) 和可溶蚀的矿物成分时, 就会由于渗透压力和水的作用产生机械和化学作用, 从而降低软弱层的力学强度等,

可能危及大坝安全。在平原河谷地段,严重的绕坝渗漏还可能造成下游农田的浸没。

西方国家在防洪堤坝建设上的投入大,堤坝质量高,多为混凝土结构,隐患小,一般没有大的渗漏,因此在渗漏探测技术和设备研制上存在不足,只有美国和瑞典生产过用于混凝土水利工程隐患探测的设备^[5]。国内探测渗漏的方法基本上都是基于地球物理勘探手段,主要方法概述如下^[6-10]。

1.1.1 电法勘探技术

电法勘探技术在20世纪80年代用于水利工程渗流隐患的原体探测。它提高了工作效率,使有损检测变为无损检测,检测范围也加大了。电法勘探技术主要有直流电阻率法,包括高密度电阻率法、激发极化法、自然电场法等。工程中往往采用其中一种或几种方法的结合,无需钻孔就可以达到原体探测浸润面、集中渗漏通道、强透水沙砾石等。

该技术的主要缺点是:对于具有几何形状的堤坝探测理论及测试方法还有一些不尽完善的地方,资料的解释也有待从定性、半定量逐步提高到定量阶段,还需要加强实验,并从探测实践中总结经验。

1.1.2 CT技术

CT技术是在不破坏物体结构的前提下,根据在物体周边所获得的波速或X射线强度等某些物理量的一维投影数据,通过计算机进行一定的数学运算处理,重建物体特定层面上的二维图像,并依据一系列二维图像重构该物体的三维图像。20世纪70年代末该技术开始在地球物理探测中应用,利用地震波进行地层层析成像,一般称为地震波析,80年代中期开始在水利工程中应用。意大利发展了声波层析探测技术,它是利用直达波走时对坝体介质的波速分布进行反演,从而获得大坝的CT成像。日本也开展了大坝CT研究。1990年,日本协力事业团曾协助我国对丰满大坝进行了CT检测,获得20个坝段的横剖面波速分布图。

CT技术目前主要适合于对混凝土大坝的检测,尚未见CT技术在土坝特别是江河堤坝隐患探测中的实际应用。

1.1.3 探地雷达技术

探地雷达是近十年迅速发展起来的一种无损地层探测新技术。探地雷达发射的电磁波在地下介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形随

介质的电性质及几何形态而变化,记录这些变化,经计算机进行特定的数据处理,可得到探地雷达图像剖面,根据图像的反射波组的波形与强度特征,通过同相轴的追踪确定反射波组的地质含义,从而达到探测目的。

由于探地雷达探测图像是对地下介质物质构成、结构密度、含水率、空隙率等特征的综合反映,所以如何细致地识别、分离这些特征,是能否把探地雷达应用于水利工程探测与工程隐患预报的关键。对于堤坝而言,其坝体的安全至关重要。因此,借助国外探地雷达探测技术,同时又结合我国水利工程的特殊应用环境,对该技术性能及应用方法作进一步深入的研究,开发一套基于探地雷达技术的堤坝险情及隐患快速探测系统,对确保堤坝安全度汛有着十分重要的意义。

但是从总体而言,由于地球物理探测是一种间接勘探方法,其基本原理和方法在理论上没有大的突破,每一种方法都有其条件性、局限性和多解性,特别是在渗漏通道埋深大而空间尺寸相对小的渗漏通道探查方面显得无能为力。

1998年洪水期间发生的许多险情和决口都是由于渗透通道形成的管涌和蚁穴鼠洞、裂隙异物和局部疏松土体等造成的。为此水利部和防汛办于1999年3月在湖南宜阳召开了“堤防隐患综合检测技术检验会”,当时有我国的十几家科研院所、大专院校和少数厂家(包括美国的劳雷公司)参加。检测堤段位于宜阳的一段废堤上。每个参检的检测方法负责200m堤段,时间是2h。几处“隐患”是事先人工布置的,埋设了稻草、钢管,模拟蚁穴和鼠洞。人们使用的测试手段包括:高密度电阻率法、瞬变电磁法、地震波法、弹性波法和探地雷达等。这些方法都有一定的分辨率限制,即分辨尺寸与深度之比一般是相对固定的。检测结果聘请有关专家评审、打分。组织者对于最后的测试结果是不满意的^[11]。

通过在湖南宜阳进行的检验会我们已经看到,对于较深层隐患的探测,没有哪一种无损物探方法是很成功的,就目前的物探仪器的水平来看,完全依靠地球物理方法探测渗漏的发生堤段是存在风险的。

地球物理勘探渗漏研究存在一定的困难和局限。事实上,地层介质与地下水之间是相互作用的,这种作用包括物理的和化学的,甚至是生物的,地层介质的特征经水-岩间的各种作用后,在地下水流动场,包括化学场、温度场等中必然有所反映。应用基于地下水天然流场的综合示踪(天然示踪和人工示踪方法)探测技术研究渗漏问题,可以弥补地球物理勘探手段的不足。调查渗漏问题,如无人工和天然示踪方法的应用,在

很多情况下要查清楚水库（堤坝）的渗漏是不可能的^[12]。往往采用示踪方法可以对水库的渗漏处理提出更可靠和更经济的方案，而采用示踪方法本身所产生的费用跟处理费用比，可忽略不计。当然和常规方法或非示踪方法结合，也是必需的。

1974年以前我国基本上使用常规方法，南京水利科学研究院从1974年开始用同位素示踪法来观测病险库的渗漏，取得了重大经济效益。例如湖北省十大水库之一的温峡口水库，筑坝后随着蓄水水位的抬高，渗漏越来越严重。因此根据常规资料各方提出的处理方案有：①用混凝土防渗墙加灌浆处理，投资1620万元；②用大湾页岩构筑滚坝处理，投资3389万元；③在老坝下游500m处另建新坝，投资4070万元。但1984—1985年（李樟苏，1986），南京水利科学研究院用同位素对渗漏进行了五次观测，同时进行了工程地质钻探和各种试验研究，总投资114万元（其中同位素观测打孔19万元，现场观测费5.5万元）。提出了新的加固方案，实践结果约耗资300万~400万元^[13]。

1.2 综合示踪方法的门类

综合示踪方法包括天然示踪和人工示踪，如图1.1所示。



图1.1 地下水示踪常用方法

1.3 天然示踪理论基础及目前研究动态

水中几种重要天然示踪剂通常用来获取在湖泊和水库中的漏水点的位置和起源,具体一点,水的天然示踪可获得以下几个方面的信息。

(1) 确定出现在堤坝下游冒水和坝肩的地下水的来源。常见一些靠近坝址的泉水是相邻含水层的补给或是当地降水入渗形成的地下水和库水的混合。因此,当着手调查渗漏时,首先要做的是调查清楚冒水的来源,是否完全来自于库水,即使有时冒水看上去是明显来自库水,但实际测试结果可能却刚好相反。

(2) 调查下游冒水的水动力学特征。这项调查应该分析某种随时间变化的成分、特别是库水中某种特征化学成分的浓度或同位素成分。在这种情况下,研究的主要内容是当库水一些成分变化时,是否冒水的成分也发生了变化。有时还要确定成分浓度的时间变化,时间上的滞后可以反映库水与泉或水库与坝下游钻孔间的流动时间。如果在坝下游有不同的泉存在,则对不同的流动路径其流动时间是不同的,因此应当对每个泉分别进行调查。显然在这种情况下,首先要做的是确定补给这些泉水的地下水和库水是否含有相似的化学或同位素成分。

水的天然示踪剂主要包括以下一些方面:① 水的温度;② 电导率;③ 化学成分包括水的其他成分;④ 水中的稳定同位素:氘(D)、氧-18(^{18}O);⑤ 氚(^3H),主要来自于近几十年来的热核反应中的核试验。

需要指出的是,除了上面提及的示踪剂外,其他通过不同方式或途径进入水中的物质在适当的情况下也可作为示踪剂。

(1) 城市、工业、农业排放到水库中的废水。这些废水根据它们的来源不同常常包含一些特定的化学元素,这可以建立起库水与泉水以及坝下游的地下水之间的水力联系。例如城市废水常使得库水被污染,因而氮化合物以及 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 等离子浓度较高;工业废水中,重金属元素如铁、铬、钒、锰、汞、铅等以及一些有机成分如苯酚、烃等能进入水库;农业废水中,一些杀虫剂、硝酸、铜化合物等,所有的这些都可用来调查水库的渗漏。

(2) 悬浮的沉积物。在高水位期间,特别是洪水期间,沉积物由于流域内土壤侵蚀被带入水库,这些悬浮的沉积物能对整个库水进行标记,并能在与库水相联的泉水中探测到,特别是当渗漏通过坚固岩体的

破碎带时,可获得可靠的结论。

(3) 出现在水中的微量元素和示踪元素。例如:位于地震活动区的水库或由于残余的火山活动,使得水中的一些微量元素(如硼)的含量较高。硼示踪剂在尼加拉瓜的 Asososca 湖^[14]的污染评价中得到很好的应用。

(4) 溶解气体,例如氢气。这些气体可在建立库水与下游的泉水或地下水是否存在水力联系中发挥重要作用。氡-226是一种放射性惰性元素,实际上,它是属于铀-238家族的,因此,在地下水或气体中,它的浓度极易发生改变,由于是一种气体,水表面的氡易逸出到空气中,因此,在河水和水库中它的浓度极低,但在地下水中浓度会很高,特别是在含铀成分高的岩石中,如花岗岩。因此对库水和下游冒水中的氡元素进行简单的分析就能知道泉水是否来自于水库。

水库中的一些天然示踪剂,随着时间的变化,它们的浓度有着很大的变化,例如有些示踪剂呈现的季节性变化,利用这些示踪剂来调查水库的渗漏问题需要很长的观测时间以及明确的取样方案,以便建立起库水与下游泉水之间可能的水力联系。

1.3.1 温度电导率示踪

1.3.1.1 水库中温度电导率分布

在许多情况下,水温是调查水库和湖泊渗漏的一种极好的示踪剂,原因是世界上不论温带还是热带,水库中的温度都呈层状分布,只有特别浅的水库(水深不足10m),水的温度才会基本一致,而且也是与大气温度交换的结果。热量的层状分布是由于湖水与空气的热量交换常在两个方向上进行,在夏季,表层水很快被加热(正热流),并且热量不断往下传,由于温度的升高,水的密度减小,加热表面上的水会形成一个稳定的水柱,相反,在冬季,上层的水变得越来越冷(负热流),由于冷水的密度大,在垂直方向上发生了水的混合。在大多情况下,在寒冷季末,湖水或库水在垂直方向上有大体一致的温度范围。

湖水中热量的层化导致相应的高温水和低温度水之间的热量交换,在夏季,当上层不断有热量补充时,交换的深度会不断增加,而在秋冬季节,迅速停止,这也就是说,有垂向流的产生。位于变温层上部的称之为表水层,位于下方的为下层滞水层。在高纬度带,湖水温度会永远呈层状分布。

水库或湖泊中的热量层化作用将严重影响其物理、化学和生物等各

种特性,例如氧化只能发生在有氧的环境中,而厌氧的生物只能生活在没有氧气的环境中。由于来自于大气的干扰(太阳、风),以及表层水的流入和流出,河床的不规则性,因而对水库的这种温度层状研究是相当困难的。

湖泊的热量层化可用如图 1.2 这样的图表来解释,这个图是对智利的 Laja 湖进行研究后得到的结果^[15]。在这张图中,画出了整年库水的等温线,显然由于当地气候条件的正常循环,库水温度呈较小的年变化,如图 1.2 所描述的,湖中深层(50m 以下)水的温度基本保持不变,只在 5℃~6℃ 范围内变化,水的完全混合发生在 7 月和 8 月,这也就是南半球的冬季。由于热量的交换发生在湖水的最上层,因而可用于辨别下游泉水来自于湖水的哪个层位。

另一方面,需要指出的是,除了上述提到的热的层化以外,许多湖泊和水库表现出盐的层化,这主要出于这样一个事实,深处水的盐度要大于表层的水,因而深处水的电导率值相对浅层的水来说要大。

水体密度在垂直方向的改变主要来自于不同的温度、盐度。同样它们也决定了水柱的稳定,密度的梯度越大,水柱越稳定,稳定由冲击频率 N 来表达, N 由下式给出:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad (1.1)$$

式中, ρ ——密度;

g ——重力加速度。

Fischer^[16] 等人在 1979 年就对发生在层状水流中的混合过程进行了详细的研究,他们的研究中也包括对湖水与空气的能量交换,水的对流运动对层中水的快速混合有着很大的作用,热量在垂直方向的弥散系数在一个很大范围内变化,变化的范围从 10^{-5} ~ $10\text{cm}^2/\text{s}$ 之间,垂直方向的弥散系数决定了湖水中不同层间的热量交换,这也就是著名的 Fick 方程:

$$F = -D \frac{dC}{dz} \quad (1.2)$$

式中, F ——垂直于 Z 轴方向上单元面积的热流量, $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

dC/dz ——给定时间内热流梯度, $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-1} = \text{J} \cdot \text{cm}^{-4}$;

D ——垂直方向的弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

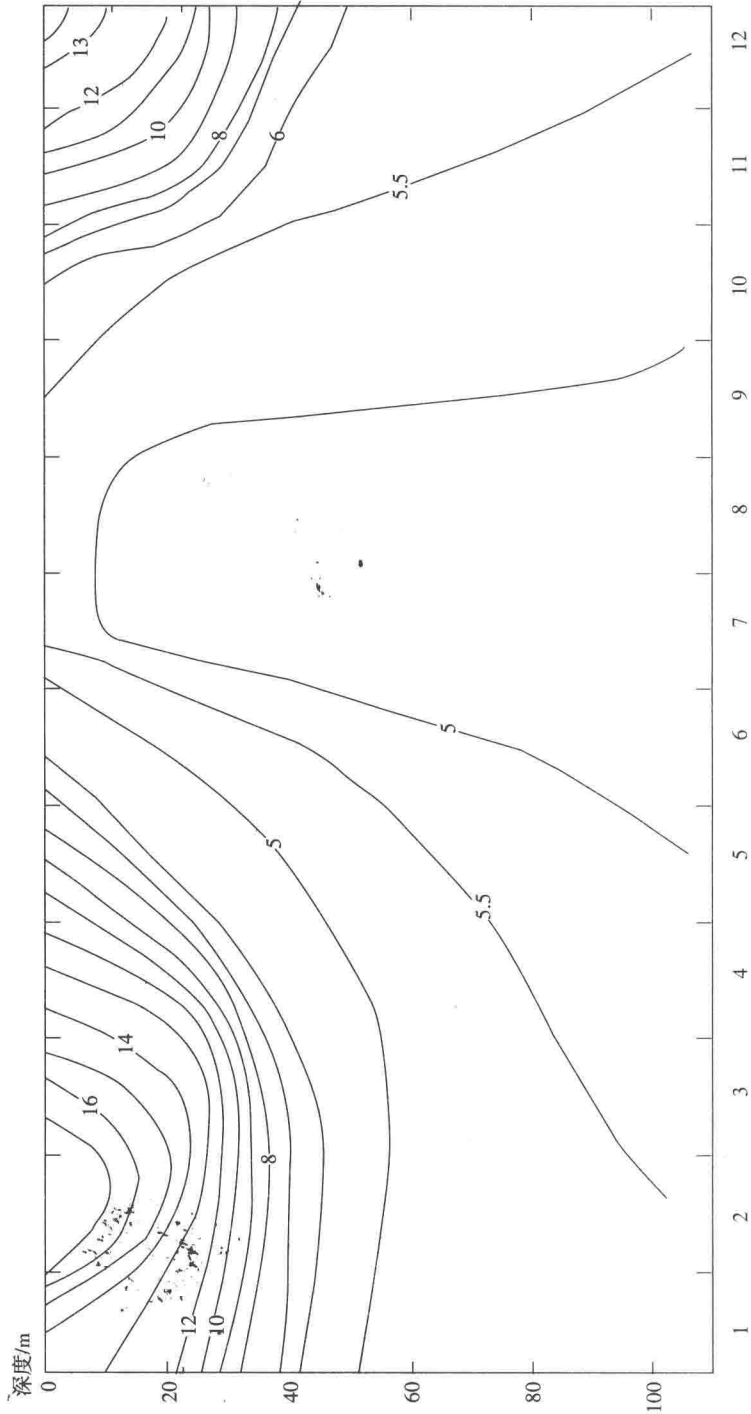


图1.2 Laja水库每年的温度分布示意图