

中等专业学校教材試用本

水文地质学

(地下水动力学部分)

宣化地質学校編



中国工业出版社

中等专业学校教材试用本



水文地质学

(地下水动力学部分)

宣化地质学校編

中国工业出版社

本书簡明系統地闡述了地下水运动規律的基本知識。其內容主要由两部分組成：第一部分敘述了地下水运动的基本定律、地下水在均質岩层和非均質岩层中穩定运动的主要計算公式，及地下水非穩定运动的基本計算方法；第二部分介紹了地下水流向集水建筑物及水工建筑地区的运动和計算方法。

本书可作为中等地质学校水文工程地质专业的教材，也可供一般水文地质工作者系統学习地下水动力学和工作中的参考。

水文地质学

(地下水动力学部分)

宣化地质学校編

*

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)
(北京市書刊出版事業許可證出字第110号)

地质印刷厂印刷

新华書店科技发行所发行·各地新华書店經售

*

开本787×1092¹/₃₂·印张6·字数131,000
1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷
印数0001—2,537·定价(9—4)0.59元
統一書号：15165·539(地质—11)

目 录

緒 論	5
第一章 地下水运动的基本定律	11
§1. 地下水运动的概述	11
§2. 直綫渗透定律 (达尔西定律)	12
§3. 非直綫渗透定律	15
第二章 岩石渗透系数的测定方法	18
§1. 經驗数值和經驗公式	18
§2. 在實驗室測定渗透系数的仪器和方法	20
一、常水头測定渗透系数的仪器和方法 (27) ——	
二、变水头測定渗透系数的仪器和方法 (31)	
第三章 均质岩层中地下水的穩定运动	38
§1. 均质含水层中潜水和承压水的均匀运动	39
一、潜水的均匀流方程式 (39) —— 二、承压水的均匀	
流方程式 (41)	
§2. 潜水在隔水层水平时的非均匀运动	43
§3. 潜水在隔水层傾斜时的非均匀运动	
—— 卡明斯基近似方程式	48
§4. 放射流方程式	61
§5. 考虑渗入量时潜水在河間地块的运动及潜水分水	
岭的位置	65
第四章 非均质岩层中地下水的运动	74
§1. 概述	74
§2. 层状岩层中地下水的运动	75
§3. 潜水在双层水平岩层中的运动	82
§4. 透水性沿流向漸变情况下厚度固定的岩层中承压	
水的运动	83
§5. 透水性沿水平方向急剧变化时地下水的运动	86
§6. 构造复杂的非均质岩层的地下水运动	87

第五章 潜水非稳定运动	89
§1. 概述	89
§2. 有限差数方程式 (卡明斯基)	89
第六章 地下水流向集水 (引水) 建筑物的运动	98
§1. 集水建筑物的类型	98
§2. 地下水流向水平集水建筑物的运动	101
一、完整渠道 (101) —— 二、非完整渠道 (102) ——	
三、有降水渗入时的渠道 (104)	
§3. 地下水向自流井运动的方程式	107
§4. 地下水向潜水井运动的方程式	116
一、潜水完整井公式 (116) 二、潜水非完整井的	
公式 (121)	
§5. 地下水流向潜水自流井运动的方程式	124
§6. 非均质层状岩层中地下水流向潜水井、自流井的	
方程式	125
§7. 裂隙岩层中地下水向集水建筑物的运动	128
一、裂隙潜水井方程式 (128) —— 二、裂隙自流井方	
程式 (130)	
§8. 吸收孔 (注水孔)	131
§9. 互阻钻孔 (干扰孔) 涌水量的计算	135
一、互阻钻孔的一般方程式 (135) —— 二、阿利托夫	
斯基削减法 (149)	
第七章 水工建筑物下潜水的运动和水庫渗漏及	
回水	151
§1. 流网	152
§2. 坝下渗流量的一般算法	160
一、坝基为均质岩层的坝下渗流量 (160) —— 二、坝	
基为非均质岩层的坝下渗流量 (163)	
§3. 绕坝渗流量的计算	164
§4. 水庫渗透损失	167
§5. 水庫岸边潜水回水及其计算	172
附 录	188

結 論

§1. 地下水动力学的研究对象及在国民 經濟建設中的意义

地下水动力学是研究地下水的运动規律及实际应用这些規律的科学，是水文地質学的一部份，是水文地質学的一个分支，因此，也有人将它称为“动力水文地質学”。它是用水力学的方法来研究地下水在多孔岩层、裂隙岩层及喀斯特地区流动規律的科学。

地下水动力学是一門綜合性的实用科学，它主要的是从数量上对水文地質問題进行評价，提供工程措施的合理建議，而广泛地为社会主义經濟建設服务。

地下水动力学，系根据水文地質勘探資料进行計算，在城市或工矿企业区，可以确定建筑物的类型，数量和地点的布置，以充分利用地下水利資源保証供水需要。在水工建筑物区，可以确定坝基滲漏量，浮托力及坝下滲透速度的大小，水庫地带被浸沒范围以及从数量上去論証水庫滲漏的可能性，帮助合理地选定坝址，并相应地提出工程措施的建議。在矿床开采，基坑及盐漬化地区，与地下水作斗争，必須进行一系列人工降低地下水位的排水措施，通过地下水动力学計算，可以解决排水降深与涌水量的关系，集水建筑物类型的选择和合理的布置，以保証生产建設順利地进行。

此外，在其他一些实际生产部門中，也多应用地下水动力学的知識来解决有关的水文工程地質問題。如上所述，可

見地下水动力学是社会生产中必需的知識，尤其是宏偉的社会主义建設事业中不可缺少的知識之一。所以它也是水文地质学中重要的一部分。

§2. 地下水动力学的发展簡史

地下水动力学的形成和发展，和其他許多科学一样，首先是因为人們生产实践的需要，在生产斗争的过程中不断的积累經驗，这些經驗的分析总结提高，并配合一些实验室的研究，由零碎到系統，由局部到整体逐渐发展起来而成为一門独立的科学。

我国的祖先在很早的时候便有許多水利工程的建筑及打井取水的技术。因为当时反动封建統治者們根本不重視为广大人民謀福利的宏偉建設，所以这些經驗沒有进行总结研究和提高到理論水平，也沒有更多的机会去实践，只好让它烟消云散了。

最早提出有关地下水动力学理論的是法国水力学家达尔西。他根据劳动人民在生产实践中的經驗，吸取地下水时，在不同岩石中有不同的水量，而且也与水头差的大小有关，但是，究竟有怎样的規律呢？1852年达尔西在实验室用圓筒装沙子，来进行水在沙中渗流的試驗，經過多次实验研究才得出了达尔西直綫定律。1857年，法国另一水力学家裘布衣，将达尔西定律用于生产实践中，总结出来在自然界地下水运动的基本定律——裘布衣方程。这些理論应用到实际工作中指导了生产。由于在生产斗争中所遇到的問題更多更复杂，后来又有許多学者不断总结研究生产中的經驗，而逐渐丰富了地下水动力学的内容。

在资本主义社会制度下，由于建設事业是无組織、无領

导和无计划的进行，虽然有了地下水动力学的知識，只是分散在其他各种科学之内，而没有形成一門独立的科学。

在偉大的苏联十月革命胜利以后，不仅給人类历史发展的道路开辟了新的一頁，而且在科学領域中也是一个轉折点。由于苏联宏偉的社会主义共产主义建設计划，要征服一切对人类有害的自然因素，利用一切天然财富为人类服务，开始了人类历史空前的一个接連一个的五年计划，兴建許多偉大工程，大力开发自然资源，与大建設紧密相連的水文工程地質事业得到突飞猛进的发展。苏联的社会主义建設不是为少数人的利潤，而是为广大劳动人民謀福利，因此对长远利益和人民生命财产的安全特別重視，因而对水文工程地質工作也十分注意。于是地下水动力学的理論得到了广泛应用的机会，并且在生产实践中受到了考驗，得到了提高。由于生产的需要，也大大推动科学研究工作的发展。許多苏联的学者，根据生产实践中劳动人民的經驗，加以分析研究和实验，又提出許多新的关于地下水动力学的理論。例如巴甫洛夫斯基在1922年創立了水工建筑物下潛水运动精确的流体力学理論，提出了达尔西定律应用范围的判断問題，首先利用水电比拟法来研究地下水的运动，随后又有許多人研究和总结成文的著作。

由于实际工作的需要，迫使許多参加实际工作的人員写了許多关于如何計算井、孔涌水量的书籍，和許多操作工作方法指南一类的书籍。

苏联学者卡明斯基研究了在自然界常見的非均質岩层中运动的問題，流量随時間变化的非稳定运动問題，这就使得地下水动力学的理論更有可能与水文地質天然条件相接近，可以更精确的解决一些实际問題。而且卡明斯基首先全面总

結了有关地下水动力学的理論，写成地下水动力学原理一书，作为苏联高等学校講課的教材。从此，地下水动力学便成为了一門独立的科学。这門科学在苏联虽然建立較晚，但是进步很快，到現在它無論在理論成就或实际运用上都远远超过資本主义国家跃居世界第一位。

我国解放以前在落后的社会制度下，在反动黑暗政府統治下，統治者对人民的生活福利毫不关心，根本談不到什么大的建設事业。因此与大建設紧密相联，为人民福利的水文工程地質事业也不可能发展，当然更沒有地下水动力学的产生。

解放以后在党中央和毛主席的领导下，开展了大規模的社会主义建設，随着建設生产的需要也诞生了我国的水文工程地質。由于党的英勇领导，由于生产实践的迫切需要，由于苏联和其他兄弟国家的无私援助，使我国的水文工程地質科学得到飞跃发展。其中的地下水动力学也随着成长和发展起来了。在生产建設中运用地下水动力学原理解决了許多实际問題，在运用过程中也发现一些与实际情况不完全相符合的理論，也总结出一些經驗，因而更丰富了地下水动力学的理論，并促使我国的水文地質工作者要研究結合我国实际情况的地下水动力学。例如我国的第四紀含水层，在許多地方都是非均質含水层，而且結構极其复杂。在目前，地下水动力学只是对均質岩层研究得比較詳細，而对水文地質条件复杂的非均質岩层研究得还不够，还不能滿足生产的需要。有待我国的水文地質工作者进一步研究。

又如我国目前所修建的水工建筑物和矿山，大部分都是在坚硬和半坚硬的裂隙岩石中，而地下水动力学大部分是討論在疏松的孔隙岩石中的运动規律，对裂隙岩石研究很少，

地下水在复杂的裂隙含水层中的运动规律是否都可以用在孔隙岩石运动的公式呢？这也有待于我国的水文地质人员来进一步研究解决。

由于我国气候的特征，南方多雨，地下水经常得到不均匀的补给，西北方少雨蒸发强烈，地下水时而有补给，时而又消耗于蒸发，再加上人为因素的影响，使地下水常常呈随时间变化的非稳定运动。而对非稳定运动的研究也正是地下水动力学中薄弱的一环，也有待于今后继续研究。

从上述可知，我国的地下水动力学是在解放以后，随着社会主义的伟大建设事业才开始建立起来的。在短短的几年中能够得到飞跃的发展是与党的领导和苏联的援助指导分不开的。但是，它还不能完全满足生产实践的需要，还应继续发展提高。因此，我们今后应当继续学习苏联的先进理论和经验，更好地注意与我国实际情况相结合，并且在生产实践中不断地总结分析研究，提高和发展现有的理论水平，使地下水动力学更好的为社会主义建设服务。

由于我们的培养目标和学习时间的限制，不能详尽地来研究地下水动力学的全部知识，只能对地下水动力学的基本知识加以系统的讲述，为将来工作的运用进一步提高打下基础。因此本教材将讲述下列内容：地下水运动的基本定律；渗透系数的测定；地下水均质岩层中运动的基本方程；地下水在非均质岩层中的运动；非稳定运动的基本方程；地下水流向集水建筑物的运动；潜水回水；水工建筑物下地下水的运动和水库渗失。

地下水动力学是运用水力学的基本概念和理论来研究水在多孔介质中的运动，并应用数学的分析计算方法，因此我们要很好的掌握地下水动力学，必须有很好的数学和水力学

的基础同时地下水动力学它是用于解决水文地质问题，在运用某一公式时必须要有很好的分析地下水运动的客观环境——水文地质条件。因此我们在学习地下水动力学时，决不要单纯从数学、水力学观点去分析，更要注意它的物理意义和推导公式的出发点，不是单纯的死记一些公式，而要在不同水文地质条件下会选择适当的公式去解决具体问题。

第一章 地下水运动的基本定律

通过水文地质原理的学习，我們知道地下水存在的主要形式（态）有汽态水、結合水、自由水、重力水和毛細水。各种形态的地下水并不是在岩石中静止不动，而是不断的运动和相互轉化的。影响各种形态地下水运动的因素有：1. 大气降水的渗入；2. 蒸发作用；3. 温差；4. 分子引力；5. 表面張力；6. 重力；7. 水头压力等。关于包气帶各种水的运动特征，已于水文地质原理中闡明，故不再重复叙述。地下水动力学主要是研究飽水帶重力水的运动規律。下面加以詳細討論。

§1. 地下水运动的概述

充滿岩层孔隙和裂隙中的地下水，在重力作用下由高水位向低水位处运动。地下水在空隙中的这种运动叫渗透。由于重力作用地下水垂直向下运动，則称为渗入。

地下水在岩石中的运动条件是极其复杂的，它决定于水本身的性質和其周圍的介質——岩石的性質，以及其他与水流有关的因素。因此我們在研究地下水的运动时不能单纯从水力学的观点来解釋，还要用辯証唯物主义的观点进行全面分析研究。在研究中应当考虑岩石的性質主要是渗透系数 (K)，渗透速度 (v)，流量 (Q)，压力水头及渗流路径等。由于自然条件的复杂，这些要素往往不可能测定出真实的指标，則常用一些平均数表示。

从結論中知道：虽然地下水的运动已进行过很多的研

究，从生产斗争中已总结出许多经验而提高理论水平，但是还远远不能满足当前生产的需要，还有许多实际生产问题不能得到精确的计算结果，有待于今后继续研究，以满足社会主义共产主义建设的需要。

§2. 直线渗透定律（达尔西定律）

达尔西定律是一个实验定律，它是地下水动力学基本的定律。1852年法国水力学家达尔西首先基于水在砂中的渗透试验而确定的。实验的过程是用一套达尔西仪^①（见图1—1），一个金属圆筒其底有孔眼使水能流出，底上垫一铜丝布，筒内盛满砂，上端有一进水管，下端有一出水管，均带有阀门可调节水量。在上下端各装一水银测压管，以检查水在砂中渗透流动时的压力变化情况测定水头损失。在出水管旁放一有刻度的水槽，以观察渗流量。

控制阀门用不同的水头压力得出不同的流量，在测压管上有不同的水头差，经过多次试验证实：渗流量与水头差、渗透路径长度及过水断面有如下的关系：

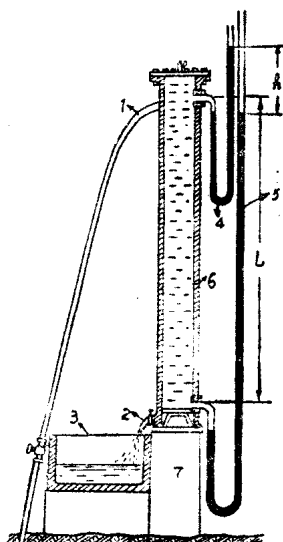


图 1—1 达尔西渗透仪
1—进水管； 2—阀门（开关）；
3—量水池； 4、5—测压管；
6—金属圆筒； 7—底座

① 为便于教学，将达尔西渗透仪的水银测压管改用水的测压管，同时，将测压管5的位置向上稍微移动，以便在图上能定时表示出水头损失（ h ）并在图上加划了渗透路径长度（ L ）。

$$Q = K \frac{h}{L} \omega \quad (1-1)$$

式中 Q ——流量即单位时间内经过砂所渗透过的水量
(升/秒)；

h ——水流上下断面的水位差(由上下两个测压管中
观察出)；

L ——水的渗透路径长度即上下测压管二断面间的距
离；

ω ——过水断面面积即圆筒内横断面；

K ——渗透系数，是一个常数，其大小取决于岩石和
渗透液体的物理性质。

将公式(1-1)两端除以过水断面面积 ω 则可写成下
式：

$$\frac{Q}{\omega} = V = K \frac{h}{L} \quad (1-2)$$

式中 V ——渗透速度。

令 $\frac{h}{L} = I$ 代入(1-2)式则得：

$$V = KI \quad (1-3)$$

式中 I 为水力坡度(或称水头梯度)，即沿地下水流向单
位流程长度内的水头损失。

由(1-3)式可以得出结论：水在砂中的渗透速度(V)
与水力坡度(I)的一次方成正比，这就是达尔西定律。因二
者是直线关系故也称为直线运动定律。后来经过实践证明，
达尔西定律不仅适用于实验室中，而且在自然界的地下水运
动也符合于达尔西直线定律。自然界地下水的流量常用米³/
昼夜、米³/小时和升/秒表示；水的渗透速度则用米/昼夜和

米/小时表示；水力坡度不再是由测压管观测，而是由上下游两断面的水位标高差除以两断面间的距离而得，无单位。如果当水力坡度为1时由（1—3）式得：

$$V = K \quad (1-4)$$

由（1—4）式说明渗透系数与水力坡度为1时的渗透速度相当，水力坡度无单位，故渗透系数有速度的单位。在自然界岩石的渗透系数常用米/昼夜或米/小时表示。不同的岩石有不同的渗透系数，在研究地下水的运动时，首先必须了解岩石的渗透系数，它是地下水动力学中很重要的一个指标。测定岩石渗透系数的方法很多，以后将专门讨论。上面所提出的渗透速度并不是水在多孔介质中运动的实际速度，而是一种假想的引用数值。因为我们是用整个圆筒的横断面做为过水断面，即包括砂粒面积，而实际的过水断面只是砂粒之间的孔隙部分（见图1—2）。上述渗透速度好象是水在未盛砂的圆筒中流动时的实际平均流速，而水在砂粒中渗透时的真实过水断面为 W ，则：

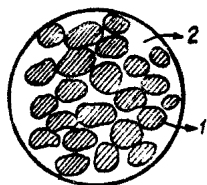


图 1—2 盛有砂的圆筒的横断面
1—砂粒；2—孔隙

$$W = n\omega \quad (1-5)$$

式中 n 为砂粒的孔隙度用小数表示，则水在砂中渗透的实际平均流速 u 应为：

$$u = \frac{Q}{n\omega} = \frac{1}{n} \frac{Q}{\omega} = \frac{1}{n} V \quad (1-6)$$

$$V = nu \quad (1-7)$$

从上式可知，水的渗透速度等于其实际平均流速与渗透岩石的孔隙度之积。因为岩石的孔隙度 n 小于 1，所以水在多孔介质的渗透速度永远小于水流的实际平均流速。这里所以称为实际平均流速是因为水流的实际流速在同一断面上各点是不一致的，在水力学中已经知道管路中的实际流速分布图，既然在管中实际流速各点均不一致，水在多孔介质中的渗透就更加复杂了，故只能是过水断面上的实际平均流速。

一般条件下 $u = (2-3)V$

自然界地下水的运动并不是全部符合于达尔西直线定律，只有当水流状态是层流运动时才符合直线定律，卡明斯基根据实际资料的研究认为：如果地下水渗透运动的实际平均流速在 1000 米/昼夜以下，均适合于达尔西直线定律。自然界中一般地下水运动的实际平均流速均在此数以下，故大多数地下水的运动均可采用达尔西直线渗透定律，以后所讨论的章节大多数也是采用直线定律。

§3. 非直线渗透定律

地下水在大空洞和大裂隙中运动时实际平均流速可能大于 1000 米/昼夜，其性质与沿渠道和管中水的运动相似，即成为流速较大的紊流运动，这种运动符合哲才——克拉斯诺波列斯基所提出的公式：

$$Q = K_u \omega \sqrt{I} \quad (1-8)$$

式中 K_u ——渗透系数，为了与直线定律的渗透系数区别而加一个符号，其物理意义与因次同前。

其他符号同前。

用推导直线定律同样的方法可得下式：

$$V = K_{ul} I^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

由公式 (1-9) 可以得出結論：当水流呈紊流运动时，流速与水力坡度的 $\frac{1}{2}$ 次方成正比。此即非直綫定律。

另外，斯姆列克尔认为在层流与紊流之間尚存在一种过渡性的混合流，因此提出計算混合流的斯姆列克尔关系式：

$$Q = K_c \omega I^{\frac{1}{m}} \quad (1-10)$$

或
$$V = K_c I^{\frac{1}{m}} \quad (1-11)$$

由此可知，当地下水为混合流时，渗流量(或渗透速度)与水力坡度的 $\frac{1}{m}$ 次方成正比。式中 m 指数值界于 1 至 2 之間。 $m=1$ 时为层流， $m=1-2$ 为混合流。 $m=2$ 为紊流。其余符号同前。

地下水的流动状态是层流还是紊流則决定于下列因素：流速、水力坡度和孔隙大小等，而这些因素又是彼此联系，互为影响的，必須綜合分析，全面考慮，判断地下水流为层流或屬紊流，許多学者提出了类似水力学中判断层流紊流的雷诺数 (Re)，也提出了由层流轉为紊流的临界流速和临界水力坡度，其具体公式这里不詳述，可參閱克利門托夫的地下水动力学。

无论是根据野外实际观察驗証，或是根据实验室的研究，許多苏联学者均认为自然界地下水在岩石中的运动状态絕大多数都是层流，即使在較大的孔隙或寬裂隙中，如果水力坡度很小，地下水渗透流速很小，則亦可能呈层流运动。也有的地方可能出现紊流如是喀斯特发育的地区，但是斯姆列克尔所提出的混合流，在自然界并没有找到証据，混合流