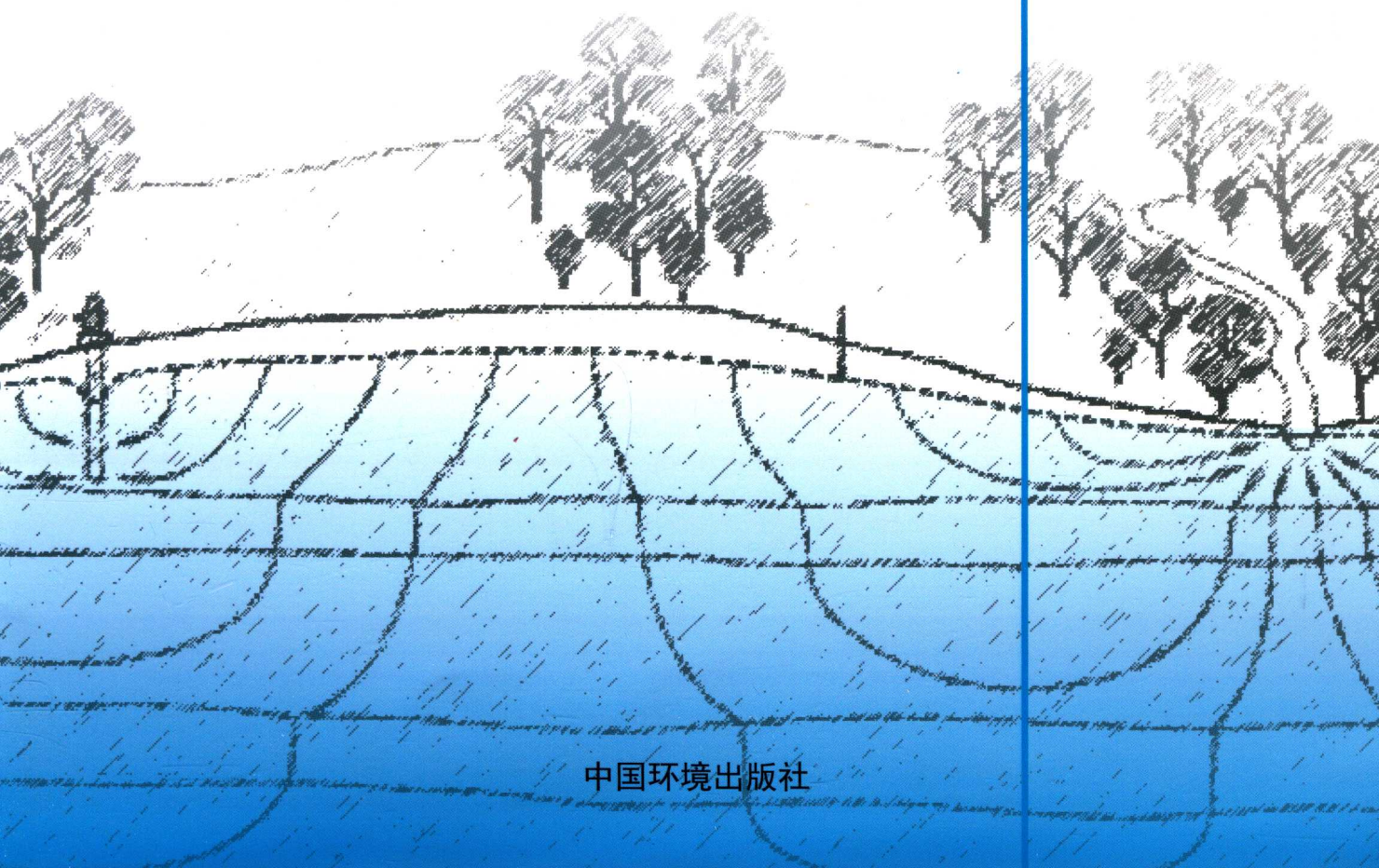


齐永强 石效卷 郑春苗 刘伟江 刘 杰 编著

潜行的宝藏

——写给环保人的 地下水科学

The Hidden Treasure
Citizen's Guide To Groundwater Protection

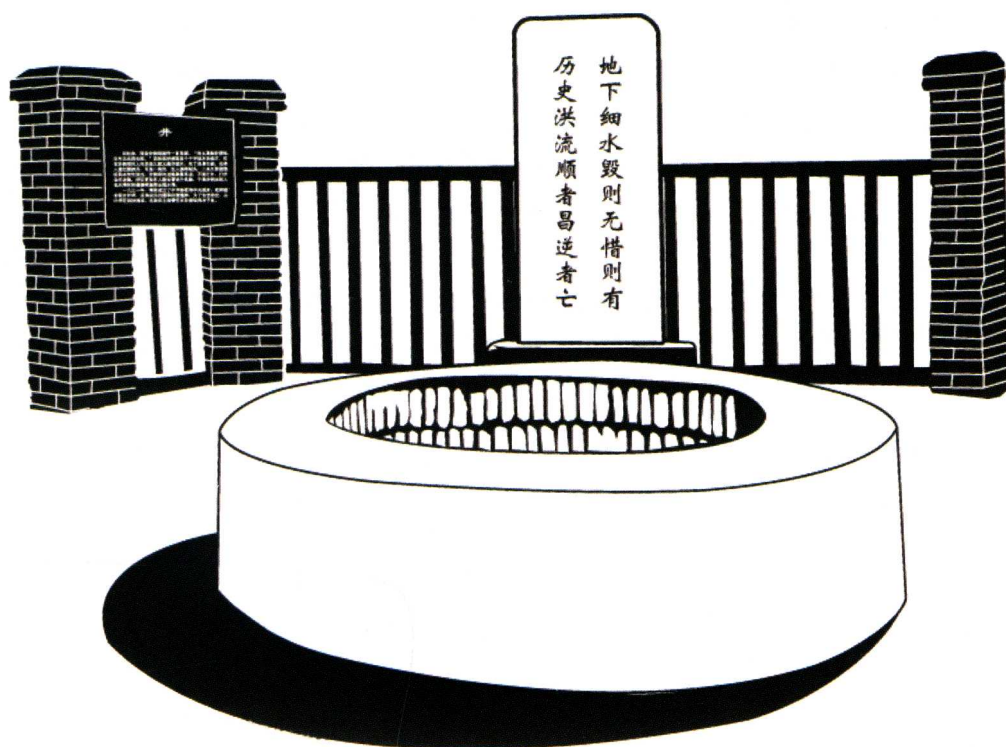


中国环境出版社

潜行的宝藏

——写给环保人的地下水科学

齐永强 石效卷 郑春苗 刘伟江 刘 杰 编著



中国环境出版社·北京

图书在版编目 (C I P) 数据

潜行的宝藏：写给环保人的地下水科学 / 齐永强等编著. —北京：中国环境出版社，2015.4

ISBN 978-7-5111-2252-0

I . ①潜… II . ①齐… III . ①地下水保护—普及读物 IV . ① P641.8-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 033007 号

出 版 人 王新程
责任编辑 李卫民
责任校对 尹 芳
封面设计 岳 帅

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015年4月第1版
印 次 2015年4月第1次印刷
开 本 880×1230 1/16
印 张 3.5
字 数 90千字
定 价 20.00元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

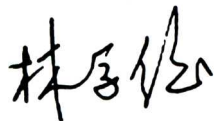
如有缺页、破损、倒装等印装质量，请寄回本社更换

序 言

一直到 20 世纪 70 年代，我国面临的地下水问题还是大同小异，主要由较为单纯的安全性需求（如饮水和灌溉）驱动。但 80 年代之后中国的超高速发展在成为世界经济发展奇迹的同时，也带来了许多严重的环境和资源问题。在粗放发展的重压下，以北方地下水水位下降和南方地下水水质恶化为标志，地下水资源枯竭和水质污染问题迅速产生，各自成为地下水问题中的重要一极。地下水问题的多极化为其管理注入了新变量，但管理体制的发展通常只能在沿袭中逐渐转向，要跟上快速发展的地下水问题谈何容易。现在看来，我国的地下水管理体制已经远远落后于地下水问题本身。

我高兴地看到，中国政府已经开始重视地下水污染问题。国务院于 2011 年发布了《全国地下水污染防治规划（2011—2020）》，旨在基本掌握地下水污染状况，初步遏制地下水水质恶化趋势，建立地下水环境监管体系，对典型地下水污染源进行全面监控，保障重要地下水饮用水水源水质安全，提高地下水环境监管能力，建成地下水污染防治体系。为此，全国许多环保工作者投入了地下水污染调查与防治工作。在此背景下，《潜行的宝藏——写给环保人的地下水科学》这本小册子的出版有很好的参考价值和现实意义。

《潜行的宝藏——写给环保人的地下水科学》是一本面向全国环保工作者的地下水科普读本，编著成员全部来自环境保护与水文地质的交叉领域，结合长期从事地下水污染教学科研以及实际工作的经验，总结了与地下水环境保护工作密切相关的 30 多个问题，并以通俗易懂的形式提供了业界的一些共识。地下水问题对我国的环保队伍来说是个新课题，对于亟须掌握地下水知识脉络的一线技术和管理人员，这本书值得一读。不仅如此，由于地下水污染问题近年来逐渐见诸报端，已经开始为社会所关注，因此对于关注环境问题的公众，这也是一本轻松易读的科普读物。



吉林大学教授
中国科学院院士
2014 年 12 月 20 日

前言



亲爱的从事环境保护工作的朋友们，请允许我们对您所从事的事业表示崇高的敬意。20 世纪下半叶是人类历史重要的转折点，环境保护的浪潮开始席卷全球，人类开始意识到必须限制自身的欲望，与自然和谐共处。作为一类特殊的环境要素，地下水的隐蔽性较强，公众一般没有能力发现和认定地下水资源和环境领域出现的问题，所以社会对地下水的认知程度较低，地下水作为环境要素所受到的关注程度远不及大气、地表水等其他要素。正因为如此，对地下水资源环境的监管往往滞后于其他环境要素，在发达国家如此，在我国也不例外。

地下水是中国的重要水源。中国 30 余年经济的快速发展为中国累积了众多严峻的地下水污染问题。尽管相关部门已经针对地下水环境污染问题开展了目标不同、深度各异的工作，但中国地下水环境管理整体性不强、总体力量薄弱仍是不争的事实。在“十二五”开篇之年，中国环境保护部将全国地下水污染防治提上议事日程，以保障地下水水源安全、控制城镇和工业地下水污染、建立健全地下水环境监管体系以及开展地下水污染普查为目标，全面推进中国地下水环境管理工作。

我国在历史上存在“多龙治水”的管理体制，目前虽确定地下水污染防治由环保部门主导，但由于历史原因，融资渠道、技术储备、数据资料、人力资源散布在不同机构中，较难形成合力。地下水对我国环保部门来说是新事物，技术和人才储备水平有限，亟须提升。

本书由环境保护部污染防治司组织编写，编著成员来自环境保护与水文地质的交叉领域，参与编制人员有井柳新、陈坚、杨丽红、孙宏亮等，图文录入排版由许雅琴完成。本书得益于多位同行细致认真的评阅，包括王东、杨晓谭、丁贞玉、李炜臻、文一、吴炜玲、张亚清、张涛等同行，在此表示衷心感谢。本书中的问题分为感知篇、观察篇、理解篇、守护篇，分别从概念框架、勘察工作、理性思辨、和谐共处四个角度解答了初涉地下水领域的科技工作者最为关注的若干问题。

像任何一门成熟的学科一样，地下水科学没有“速成”的捷径。由于篇幅和形式所限，本书难以做到全面和深刻，实际工作中需要与其他相关教材和专著结合使用。同时，很多从事地下水工作的同仁都有同感：地下水科学易学难精，基本概念和理论框架易于理解，但在实际工作中不容易深入掌握和灵活运用，需要在长期工作实践中积累经验。作者识见有限，书中错误或不妥之处在所难免，欢迎读者给予批评指正。

目 录



第一篇 感知地下水	1
1. 地下也有水吗?	1
2. 地下水有哪些用途?	2
3. 地下水储存在哪里?	3
4. 如何寻找地下水?	5
5. 地下水是纯净的吗?	6
6. 地下水如何运动?	8
7. 地下水与地表水有何不同?	9
8. 中国有多少地下水?	11
第二篇 观察地下水	13
9. 如何观察地下水?	13
10. 如何打井?	14
11. 为什么要观测地下水位?	15
12. 如何用抽水试验观察地下水?	16
13. 为什么要做物探?	17
14. 如何采集地下水样品?	19
15. 如何调查地下水污染?	20
16. 什么是水文地质图?	22
17. 如何管理地下水数据?	23
第三篇 理解地下水	27
18. 地下水科学如何发展至今?	27



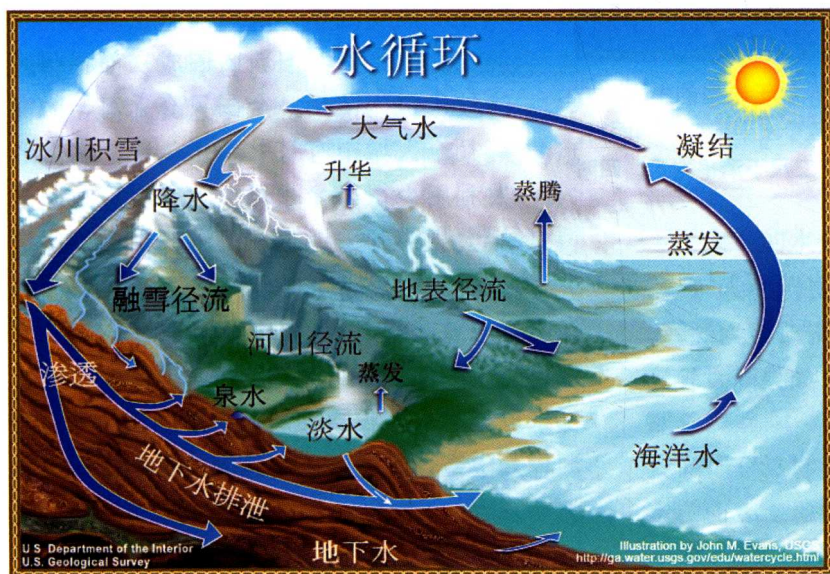
19. 达西定律是什么?	27
20. 如何描述地下水的流动?	28
21. 如何量化地下水的流动?	29
22. 地下水也有“流域”吗?	30
23. 什么是地下水模型?	32
24. 如何概化地下水系统?	33
25. 如何建立地下水流数学模型?	34
26. 如何建立地下水污染模型?	36

第四篇 守护地下水 38

27. 地下水也会受到污染吗?	38
28. 常见的地下水污染有哪些?	39
29. 地下水污染有什么危害?	41
30. 污染物在地下水中如何运动?	42
31. 如何防止地下水受到污染?	43
32. 受到污染的地下水如何治理?	44
33. 我国如何监管地下水?	46
34. 如何借鉴发达国家保护地下水环境的经验?	47

第一篇 感知地下水

1. 地下也有水吗？



地下水是水文循环的有机组成部分（图片来源：www.usgs.gov）

君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回。

——李白

诗人李白只说对了前半，黄河之水的确从天而降，但海洋并不是水循环的终点。水在地球表面循环，浩渺无垠，无始无终；时而轻薄飘逸，翻云覆雨；时而沉毅凝重，稳如泰山；还会金戈铁马，移山填海。水的循环给地球带来了生命，也带来了生机。

陆地水在回归海洋时，一部分汇入了河流，另一部分取道地下而形成地下水，长期以来，含水地层中就储存了大量的地下淡水资源。在世界的任何地方，以雨和雪的形式降落到地面的水有一部分会渗透到地下的土壤和岩石中。

一些地下水将被保留在较浅的含水层，它可能向下游渗透到河岸而汇入溪流；有些地下

水会渗透到更深的含水层。水在回到地表或者渗透到溪流和海洋等其他水体之前，可能会流经很长的距离或者长期储存在地下含水层中，有些地下水可能需要几千年的时间才能再运动到地表。一般来说，越是深处的地下水，其流动越缓慢。如果含水层的渗透性较强而地下水可以轻松穿过，人们就可以挖井取水用于各种用途。

当地下水自然出露的时候，就形成了泉。泉有大有小，小的只有在雨后才会出

现，而大的则每天可以流出上万吨的地下水。泉可以在任何岩石中形成，但是在石灰岩和白云岩中较为常见，这些岩体很容易产生裂缝并受到雨水的溶解，由此形成的孔洞有助于泉的形成。

并不是所有的地下水都是由雨雪入渗形成的，例如在沙漠地区，每年降雨很少，地面也缺少河流和湖泊，但有些地方仍然有地下水形成。这是由于沙漠地区地表附近的空气被晒得很热，到了夜晚土壤散热较快，空气中的水蒸气就进入土壤的孔隙中，凝结成水珠并最终聚集成地下水。这种来源的地下水叫作凝结水。

还有一种地下水叫作初生水，是由岩浆中的水蒸气沿着岩石裂缝上升并冷凝形成的。许多温泉水就是普通渗入的地下水和初生水的混合物。

有一些形成年代久远的地下水在封闭的含水层中得以保留下来。对于滴水贵如油的地区





济南的趵突泉被誉为“天下第一泉”，属于典型的中国北方岩溶地下水，补给面积巨大，泉水从三个主要出口喷涌而出，十分壮观。元代诗人张养浩有诗赞：“三尺不消平地雪，四时尝吼半空雷”（图片提供：张保祥）

（如沙漠），这种深埋的地下水资源尤为可贵。但值得注意的是，这种地下水流动极为缓慢，几乎可以看作不可再生的资源，如果开发管理不当则很容易枯竭。

2. 地下水有哪些用途？

在原始社会中，人群逐水而生，只能在河湖周边安排生活和生产；而地下水的取用则大大扩展了人类的活动范围。我国自古以来就是以“农”立国，而水利是农业的命脉。在旧社会，农民靠天吃饭，他们做梦也想着能有井水把干旱的土地灌溉好。但新中国成立前我国经济技术极为落后，全国只有上海、天津等几个大城市有打井队伍，地下水的开发利用少得可怜。新中国成立后我国开始大规模开采地下水资源，极大地促进了农业和其他行业的发展。到目前为止，在水资源缺乏的中国北方地区，65%的生活用水、50%的工业用水和33%的农业灌溉用水都来自地下水。我国的南方地区虽然地表水资源较为丰富，取用方便，但因地下水相对而言



地下水已经成为中国城市和工农业用水的主要水源，在干旱、半干旱地区，地下水甚至是唯一的可用水源。图为我国主要城市地下水供水比重，北方城市明显更为倚重地下水资源（来源：中国地质科学院水文地质环境地质研究所，张宗祜）

具有供水量和水质均较为稳定的优点，也是重要的供水水源。例如在 2010 年中国西南特大干旱灾害发生期间，中国国土资源部门主导进行了大规模的地下水开采工作，为抗旱减灾工作提供了决定性的支持。

除为人们提供水源之外，地下水还会通过其他途径造福人类。地下水与地表水相比，具有“冬暖夏凉”的特点，比如北京郊区黑龙关泉的水温就常年保持在 15°C 上下。工业上很早就有在夏天使用地下水为厂房降温的实践，目前利用地下水这种储热功能的地源热泵，已经在我国有广泛的应用。我国还有很多著名的温泉，从温泉中流出的地下热水具有保健功效，也自然造就了许多疗养度假胜地。有些循环较慢的地下水中含有很多的盐分以及多种稀有元素，这种水被称为卤水，可以从中提炼有用的工业原料。如在我国四川自贡一带，人们自古就打井取水，并从中提取食盐。

改革开放以来，地下水资源的开发状况发生了根本性的变化，由过去的生产力制约变成了资源与环境制约。地下水循环较慢，具有短期不可再生性，其开采在很多地区已经超过了地下水的再生速度。过量开采导致我国北方地区地下水水位持续下降，引发了一些社会关注。举例来说，华北平原幅员辽阔，是我国政治经济文化的中心。20 世纪 50 年代以前，这里的地下水流域还处在天然状态，浅层地下水水位埋深多在 10 米以内，普遍为 1 ~ 3 米；深层地下水具有承压性，局部甚至可以自流。而到了 2005 年，浅层地下水水位最大埋深已达 65 米，埋深大于 10 米的面积占整个华北平原面积的近一半，埋深大于 20 米的面积占两成；深层地下水已无自流区，水头最大埋深可达 110 米。

同时，国民经济的快速发展也导致了地下水污染问题，进一步加剧了地下水资源短缺。1999 年以来，我国在东部经济发达地区开展了区域地下水污染调查，但由于地下水运动缓慢，严重的污染往往呈点状分布，这方面公开的信息还不多。

在对地下水资源的开发利用中，如果不注重方式，有时也会造成危害。在地下采矿时，

如果突然遇到大量的地下水涌出造成突水事故，可能会对生命财产造成重大伤害。如果庄稼地里的地下水水位过高，水分的过度蒸发会造成土壤的盐碱化，不但庄稼长不好，严重时地面上甚至白花花一片，寸草不生。地下水的变化有时还会引起地面沉降、滑坡、海水入侵等地质环境灾害；也可能引起其他环境和生态的变化而最终反作用于人类。所以关注和保护地下水具有重要意义。

3. 地下水储存在哪里？

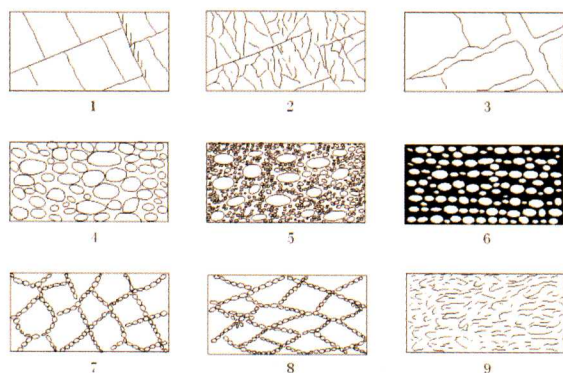
大量的水储存在地下。在这里水仍然是流动的，虽然速度可能很慢，但仍然是水循环的一部分。俄罗斯学者维尔纳茨基形象地说：“地壳表面就像饱含水分的海绵。”各种岩土类型都存在孔隙，可以为地下水的赋存提供空间。我们都有这样的经验，大雨过后，沙土地不积水，而黏土地面积水，比较泥泞。这是因为沙土地上的水可以较快地渗入地下。所以我们说沙是透水的，黏土是不透水的；或者把沙称为透水层，把黏土称为隔水层。自然界中，如果透水层下面存在隔水层，那么向下渗透的雨水或地面水就会集聚在上面的透水层中。这种充满了水的透水层就叫作含水层。寻找地下水首先要找到含水层。

接近地表的地层一般是尚未胶结的松散沉积物，对于沙砾类的沉积物，其孔隙度和渗透性主要取决于颗粒分选程度，分选性越差、颗粒大小越悬殊的松散岩土，孔隙度越小，渗透性也越差；黏性土沉积物由于结构原因一般孔隙度更大，但孔隙太小或者孔隙之间连通性不好，所以渗透性一般很低。上述的这一类地下水主要存在于砂层或砾石、卵石层的孔隙中，我们称为孔隙水。平原地区所使用的地下水多为孔隙水。

松散的风化沉积层之下的岩石称为基岩，一般比较完整，不利于地下水的赋存。例如花岗岩的原生孔隙度就很小，但因地质作用会存在裂隙，而地下水就储存在这些裂隙中，这类

地下水被称为裂隙水。岩石中之所以会有裂隙，是因为这些岩石都是亿万年之前形成的，其后经历了地壳运动等各种各样的变动，产生了许多裂隙。

沉积岩是常见的基岩种类，是地质年代中海洋、湖泊、河流中泥砂等物沉积而成的岩石，其初始状态是水平的层状结构，但在地质年代中经历了许多地壳运动，发生了褶皱，岩层向上拱起的称为背斜，岩层向下凹陷的称为向斜，可以想象，在背斜和向斜的中心（轴部）裂隙比较多。由于岩石的性质不同，产生裂隙的性质和程度也不同。经过地壳运动后，硬而脆的岩石裂隙会相对较多，而塑性强的、含大量泥质的岩石裂隙则较少。

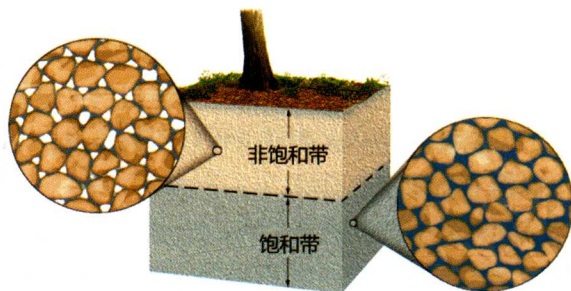


地下水的赋存空间（阿·麦·欧维奇尼科夫）

1—发育裂隙的基岩；2—发育众多裂隙的基岩；3—发育溶穴的可溶岩；4—分选良好的砂；5—分选不良、含泥沙的砾石；6—部分胶结的砂；7—黄土层中的大孔隙和结构孔隙；8—黏土中的孔隙；9—经压密而减少的孔隙

碳酸盐地层是一类特殊的可溶性基岩，在地质作用产生的裂隙或者破碎带中有地下水的流动。由于碳酸盐的可溶性，地下水会沿着裂隙掏蚀形成溶穴、溶洞。这些溶洞越掏越大，过水能力也越来越强，而这又反过来提高了地下水的侵蚀能力。岩溶现象的发育大大增加了岩层的富水性和渗透性。一般来说，石灰岩如果质纯层厚往往溶洞较为发育，岩溶水也较多。

土壤的上层是非饱和带，这里的含水量随时都在发生着变化，但是不会使土壤饱和。非饱和带的下面是饱和带，这里的土壤和岩石缝隙之间全部充满水，达到饱和。植物根系通常利用非饱和带中赋存的地下水，而人们对地下

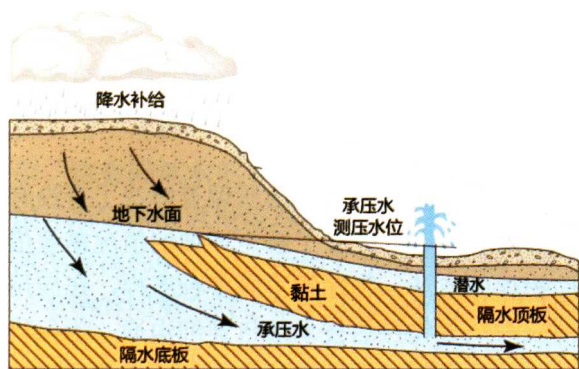


地下水饱和带和非饱和带示意图，二者之间的界面称为地下水位面，随着饱和带地下水的升降而改变位置（图片改编自：Pearson Prentice Hall, 2005）

水的开发利用主要集中在饱和带。

人们把饱和带分成透水性好的含水层和透水性差的隔水层。一般来说，市政供水井要求的含水层出水量较大，常常在每天几千吨左右；如果是小型的农用井，出水量常常在每天几十吨左右；在有些沙漠地带，单井日出水量只有几吨甚至更少，但这并不妨碍我们将它们所穿透的地层称为含水层。可见含水层是在实际工作中形成的相对概念，同样的地层在此地被认为是含水层，而在彼地可能被认为是隔水层。在世界范围内，富水性最好的是沙卵砾石沉积层，这类地层常常在滨海平原、冲积盆地和冰川活动带出现。除此之外，大面积分布的砂岩和发育了溶孔溶洞的碳酸盐岩也是很好的含水层。

含水层和隔水层通常呈近水平分布，而地下水在含水层中水平流动。在相当长的一段时期内，人们把隔水层看成是绝对不透水的，一直到 20 世纪 40 年代才发现，原先划入隔水层中的，有一类是弱透水层。这些弱透水层在一般的供水工程中所提供的水量微不足道，但在垂直方向上由于过水断面巨大（等于弱透水层分布范围），因此相邻含水层通过弱透水层交换（称为越流）的水量相当大，这时再将其称为隔水层就不合适了。含水层的划分是一个概化过程，是通过当地情况和工作目标综合分析后得出的判断，不是一成不变的定式。例如砂砾石和黏性土互层的地层，在供水意义上可能被划分为一个含水层，但在考虑地下水污染问题时可能被划成多个含水层和隔水层。



潜水含水层和承压含水层示意图（图片改编自：www.usgs.gov）

没有隔水顶板的地下水称为潜水。由于潜水含水层的厚度随潜水面升降而变化，所以其释放出的水来自于饱和孔隙中的排水，出水能力较强。充满于两个隔水层之间的含水层中的地下水称为承压水。承压含水层的厚度不随水头的升降而变化，所以其中产出的地下水主要来自含水层骨架的弹性释水，单位降深对应的出水能力较弱。与潜水相比，承压水与大气圈、地表水圈的联系较差，水循环也缓慢得多。承压水不像潜水那样容易受污染，但一旦污染后更难得到净化。

天然条件下，平原区的潜水同时接受降水入渗补给及来自下部的承压水越流补给。随着深度加大，降水补给的份额减少，承压水补给的比例加大；同时隔水的黏性土层向下也逐渐增多，潜水逐渐演变为承压水。当平原深部承压水受到开采导致其水头低于潜水时，潜水便反过来补给承压水。

4. 如何寻找地下水？

理论上说，地下介质中或多或少都含有地下水，无须费神寻找；但从实际意义上来讲，找水指的是寻找具有供水意义的地下水源，这里面就有很大的学问。据《韩非子》记载，春秋战国时期，齐国出兵远征孤竹国，得胜回师时，正值隆冬季节，河溪干涸，人马饥渴难耐，大军无法行进。大臣隰朋向齐王建议说：“听说蚂蚁夏天居山之阴（北），冬天居山之阳（南）。

蚁穴附近必定有水，可令兵士分头到山南找蚁穴深掘。”齐王采纳了这个建议，果然找到了水，解救了全军。

齐国军队当时的行军路线大约在华北平原的东部，地下水埋深较浅，挖几米见水是正常现象，但由于当时工程条件所限，仍需借助蚂蚁寻找地下水埋深最浅的位置打井。事实上这与蚂蚁冬夏所活动的位置实在没有联系，可算先贤善意的谬论，但劳动人民在长期实践中，的确根据草木的生长分布、鸟兽虫等的出没活动，总结出了一些寻找浅层地下水的线索。例如在干旱的沙漠、戈壁地区，生长着怪柳、铃铛刺等灌木丛，这些植物告诉我们，这里地表下6~7米深就有地下水；有胡杨林生长的地方，则地下水位距地表面不过5~10米；芨芨草指示地下水位位于地表下2米左右；茂盛的芦苇指示地下水位只有1米左右；如果发现喜湿的金戴戴、马兰花等植物，便可知这里下挖50厘米或1米左右就能找到地下水。在南方，根深叶茂的竹丛不仅生长在河流岸边，也常生长在与地下河有关的岩溶大裂隙、落水洞口处。例如在广西的许多岩溶谷地、洼地，成串的或独立的竹丛地常常就是有大落水洞的标志。这些落水洞，有的在洞口能直接看到水，有的在洞口看不到水，但只要深入下去，往往便能找到地下水。另外，在地下水埋藏浅的地方，泥土潮湿，蚂蚁、蜗牛、螃蟹等喜欢在此做窝聚居；冬天，青蛙、蛇类动物喜欢在此冬眠；夏天的傍晚，因其潮湿凉爽，蚊虫通常在此呈柱状盘旋飞绕。

古人重文轻理，很多劳动人民的智慧被沉淀成哲学思辨，但并未建立科学体系，定井往往成为风水先生的专利。在这种情况下，真理被有意无意地歪曲。时至今日，情形已大不相同，找水已经有科学的理论体系指导，在选定钻孔位置之前，大致要经历三个步骤：确定找水方向；实地调查访问；物探定井。

找水方向

在寻找地下水之前，需要把人们过去调查过的关于该地区的地质、地形、泉、井等资料

详细地收集和研究，分析得出本区内什么地方可能含有地下水。例如在平原地区，主要是一些湖泊和河流冲积的砂层和砾石层中含有地下水，这种含水层的分布面积往往比较大，中国东部的几大平原都是如此。在河流附近，要找古河床中的地下水；靠近山麓的平原地带，要找洪积扇中的地下水。在山区和丘陵地带，情况要复杂一些。要找地下水首先要找含水性较好的岩层，比如砂岩岩层。一般来说，石灰岩、白云岩层裂隙和溶洞比较发育，尤其是质纯层厚的石灰岩，往往是很好的含水层。但值得注意的是，含水的岩层中并不是到处都有水，例如在石灰岩中打井，只有打到含水的溶洞和裂隙才有水，否则很可能是干孔。

调查访问

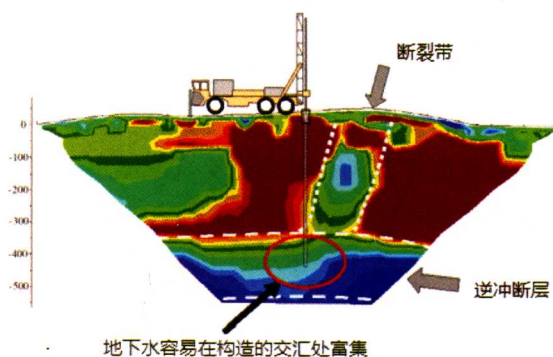
要寻找地下水，仅靠少数技术人员是不够的，还应发动和依靠当地群众，因为他们对当地的一山一水、一草一木最熟悉，尤其是一些找水的谚语，实际是劳动人民长期生产经验的总结，往往能较好地反映当地地下水的分布规律。比如“两山夹一嘴，必定有泉水”、“山扭头，有大流”等都包含一定科学道理。找水的过程中必须对现有的水井和泉水进行调查。要了解地下水是从哪一层岩土中流出来，含水层有多厚，水质好不好等，不仅要调查已经成功的水井，还要调查没有打成功的水井，综合分析过往找水的经验和教训可以使今后的找水更有把握。

山区和丘陵地区找水难度较高，不但要找到含水层，还要找有利于地下水汇集的地质构造，如断层破碎带处岩石破碎、裂隙发育，在石灰岩中的断层带往往有溶洞，含有丰富的地下水。但不是所有的断层破碎带都是含水的，有些已经被泥质充填或者胶结，也可能不含水甚至隔水。在向斜地层中，裂隙比较发育，同时岩层凹下，地下水往往向这里富集，常常出现丰富的地下水。还有不同岩石的接触带也是值得关注的地区，如富水性好的石灰岩层通过断层与富水性差的泥岩层接触，灰岩中的地下水向下游流动时受泥岩阻挡，地下水会富集在

接触带并流出地面成泉，那么在接触带的石灰岩一侧打井往往水量丰富。

物探定井

为找水进行的前期地质调查解决了有没有水的宏观问题，但要了解更详细的情况需要借助物探的方法。物探的手段多种多样，在应用前应从事物探的技术队伍详细沟通，确保物探方法的有效性和结果的可靠性。值得一提的是，现有的物探方法都是基于探测地下含水构造来推断是否富含地下水，唯有核磁共振法可以用来直接探测地下水的存在状态，具有有高分辨率、高效率、信息量丰富等优点，是近些年来发展迅速的物探方法。



用物探方法发现断裂带与区域逆冲断层的接触位置，这是地下水容易富集的位置，打井的成功率较高（图片改编自：armgroup.net）

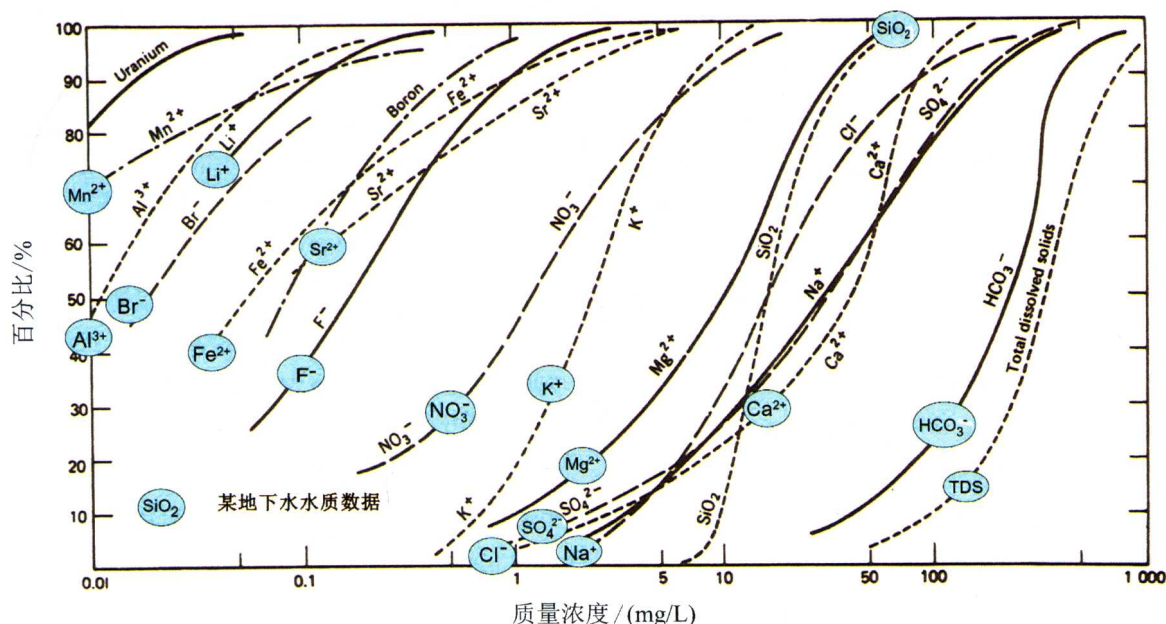
5. 地下水是纯净的吗？

相对地表水而言，地下水不易受到污染，所以人们长期以来形成了地下水水质优于地表水的观念。这一观念在很大程度上仍然正确，但也必须承认瓶装水企业的大量宣传让很多人对地下水的水质产生了不切实际的期待和幻想。地下水的水质理论上由物理、化学、生物指标共同决定。通常情况下地下水无色无嗅，也没有明显的味道，所以现实中我们仅仅关注地下水的化学和生物性状。

地下水的本底水质受两大因素共同控制：地下水所处的地质介质类型以及地下水与其接

触的时间长短。水在从地表渗入地下时，土壤中的微生物会对水质的改变起关键作用。这些微生物在降解土壤中的有机物时会产生二氧化碳，这会降低水的 pH 值并向水中提供碳酸氢根，所以碳酸氢根是地下水中最普遍也常常是浓度最高的阴离子。当地下水流程较长，与岩土接触时间更久时，水岩之间的风化作用可能

取代土壤层的生化作用而成为地下水水质的主控因素。风化矿物的化学成分不同，进入地下水中的无机离子含量也有所不同。值得注意的是，除表层土壤中天然存在的有机质之外，天然地下水中所含成分全部为无机物。一旦在地下水中检出有机物，大多数情况下可以断定这些有机物是由人为污染造成的。



Davies 等在 1966 年统计了大量美国地表水及地下水所含的化学成分并且绘制了各指标水平出现的频率分布图。图中蓝色圆点代表某一地下水样品在此分布图中所处的位置。例如标有 SiO_2 的圆点处于 SiO_2 曲线的顶部，说明此水样中的 SiO_2 含量较为特殊，高于绝大多数水样中的水平（图片改编自：Davies, 1966）

上图来源于一项被广泛引用的研究成果。从中可见，地下水中的主要阴阳离子（常见质量浓度在几个到几十个毫克/升）分别是 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 。这些离子的质量浓度总和常常占据天然地下水中溶解性固体总含量的绝大多数，在我国被统称为“八大离子”。硅在地下水中也普遍大量存在，但由于其常常被表达为非电离态而不在此列。在地下水科学里，常常把地下水所含的各种物质（包括离子、分子和各种化合物）的总量称为地下水的矿化度。用来饮用的地下水，矿化度一般应小于 1 克/升，否则地下水会发咸发苦。

除上述主要成分之外，地下水中还含有痕量成分。正常情况下，这些痕量成分不会对人体健康造成负面影响，事实上有很多还



地方性氟中毒引起的斑釉齿^①

^① 请图片拍摄者与本社联系。

是人体新陈代谢所必需的微量元素。少数情况下，完全天然的地下水中也会含有对人体有害的痕量元素，例如氟和砷，在饮用地下水中这两种元素含量过高构成了我国饮水型地方病的主要病因。

微生物在天然地下水中普遍存在，除因健康原因关注地下水中的大肠杆菌等常见细菌之外，地下水工作者已越来越多地对它们加以利用，例如利用微生物降解过程修复受到污染的地下水。地下水中某些元素的同位素（如氡、碳-14、氘、氧-18等）可以作为示踪剂对地下水来源、补给高度、年龄等特征进行推断。同位素方法发展十分迅速，已经成为地下水科学不可缺少的技术手段。

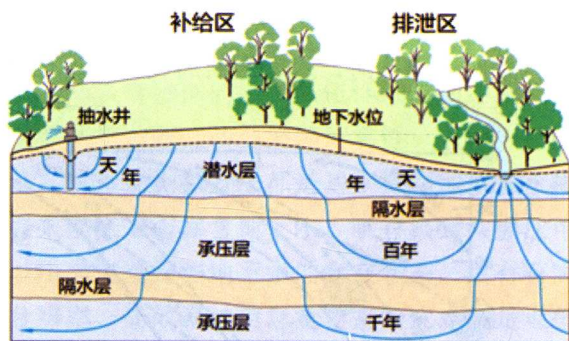
还有一种具有特殊水质的地下水，虽然不适合饮用，但可以肥田，过去的人们通常称为肥水。肥水多分布在古老的村镇附近，由于长期的人类活动，许多人畜粪尿、污水、污物、植物枝叶等经过微生物的分解，变成硝酸盐和亚硝酸盐，被雨水淋洗渗入地下水中，使地下水成为肥水。这原本是一种地下水污染形式，但在我国经济落后时期，化肥的使用远不如当前普遍，肥水是可供利用的生产资源，甚至围绕找肥水发展了一套经验方法。

6. 地下水如何运动？

水处众人之所恶，避高趋下，所以无往而不利，这种超然的境界引发了古今文人骚客的诸多感慨。如果用一句话来概括，地表水的基本运动规律就是“水往低处流”。而地下水的运动要复杂得多，要同时考虑地下水的位置和压力。

非饱和带中的水受重力和毛细力共同控制，重力使水分下移，而毛细力则将水分导向孔隙细小和含水量较低的部位。在雨季，非饱和带的水以下渗为主；雨后，非饱和带上部的的水以蒸发蒸腾的形式向上运移，而一定深度以下的非饱和带水则继续下渗补给饱和带，两者之间的界限被称为零通量面，零通量面的位置

会随入渗过程不同而发生变化。入渗的多少取决于多种因素：一般来说入渗量占降雨总量的比例在10%~40%，我国南方岩溶区可达80%以上，西北极端干旱的山间盆地则趋近于零。



补给区入渗的地下水会汇集到饱和带，随后沿近水平的方向朝着排泄区运动，还有一部分地下水会通过更深层的地下水循环通道向排泄区运动。地下水流程较短的过程以天计，流程长的过程可能以千年计，甚至更长。图中还可以看到地下水在穿过地质界面过程中发生的“折射现象”（图片改编自：www.usgs.gov）

非饱和带中的水分含量随时间和空间分布而不断发生变化，而含水量的变化会相应引起岩土介质透水能力和保水能力的变化，加之浅表地层中生物活动的影响，水分在非饱和带中的运移机理较为复杂。虽然有针对这一过程建立的经验公式，但由于变量繁多，机制复杂，本领域的理论研究和实践需求衔接程度较低，因而非饱和带往往被地下水工作者看作一个“黑箱”，仅从输入和输出过程来考量。

进入饱和带的地下水受含水层基底的阻隔，向下入渗的过程受到抑制，主流方向演变为近水平方向，向着河流和大海的方向前进。在地层深部虽然也有地下水的赋存和流动，但由于压力较大，孔隙的数量和连通性有限，所以仅在地热利用等特殊领域有实际意义。通常意义上的“地下水流”，仅指地下数百米以内饱和地下水的近水平运动，受水头高低和岩土分层共同控制。

有细心的读者会有疑问：“我在济南看到过喷涌而出的泉水，难道这里的地下水往高处流了吗？”我国习惯上把这类喷涌而出的泉水称为“上升泉”，其产生的原因是承压地下水

中的压力在泉口释放，压力水头转化为位置水头，造成了“水往高处流”的现象。如果考察总水头，仍然会符合地下水水头沿流动方向降低的总规律。这是因为真正决定地下水运动方向的是地下水的总水头，其等于位置水头、压力水头及动态水头的总和。其中动态水头较小，可以忽略不计。如果地下水在A点的压力水头远远大于在B点的压力水头，即使B点的位置高于A点，地下水仍可以从A点流向B点。

地下水在流经地质界面时常常会发生“折射”。举例来说，受重力沉积方向的影响，地层在水平方向更容易导水，水平方向的渗透系数常常比垂向渗透系数大几倍甚至几十倍，在特殊地质条件下这一差别可能达到数千倍，所以不难理解地下水在含水层中常常沿水平方向前进。相反在隔水层中地下水因受到阻隔无法沿水平方向运动，但仍然可能在垂直方向传递上下含水层的水头差，所以隔水层中的地下水流动往往是垂向的，这就是地下水折射的一种表现。再比如说，地下水通过水平相邻的两个地质体界面时，由于二者渗透系数不同，所以会形成不同的地下水力梯度，也是一种折射。

平原和盆地是我国主要的人口聚集区，这里的浅地表往往分布着松散的沉积物，岩土间孔隙比较大，是地下水赋存的理想场所。我国对平原-盆地区地下水的利用，大约占到了全部地下水用量的一半。新中国成立以来对平原-盆地区地下水的大量开发，已经改变了这里地下水的天然流动状态。虽然地下水的总体流动方向仍然朝向江河湖海等大型水体，但局地水流系统已被人类的地下水开发活动控制，地下水向着抽水形成的地下水降落漏斗中心流动。以地下水开发较为集中的华北平原为例，原来相对独立的地下水漏斗已逐渐扩大汇合，成为华北平原复合地下水漏斗，2005年漏斗面积已达到华北平原总面积的一半以上。在此类地区，仅凭地形起伏已无法准确推断地下水的真实流向，需长期的地下水位监测数据方能综合判断。

除平原-盆地区孔隙地下水外，岩溶区地下水也是重要的地下水水源。碳酸盐岩（石灰

岩、白云岩）由于其具有可溶性，一般储水空间较大，常常是流通性好的含水层。我国碳酸盐岩分布较广，有的直接裸露于地表，有的埋藏于地下，不同气候条件下，其岩溶发育程度不同，特别是北方和南方地区差异明显。受气候原因影响，南方的岩溶现象发育多比较成熟，南方岩溶地下水往往分布在地下暗河系统中，流通性极好，反而不易开发利用，常常造成“一场大雨遍地淹，十天无雨到处干”。这与地表水的特性比较接近，而地下水的流动也几乎完全由岩溶管道的空间形态决定。北方岩溶区的特点是地下水在入渗时较为分散，在流动过程中逐渐形成较大的汇流网络，最终集中排出，往往形成大型、特大型水源地，成为城市与大型工矿企业供水的重要水源。梁永平等将我国北方岩溶区划分为119个子区，其中最具有代表性的子区包括山西的娘子关泉域（7000多平方公里）和山东的趵突泉域（上千平方公里）。

我国是多山国家，山地、高原、丘陵约占国土面积的七成，基岩山区地下水是我国分布最广的一种地下水类型。但除岩溶山区外，基岩山区的地下水资源一般较为贫乏，不适宜集中开采，但对山地丘陵区 and 高原地区的人、畜用水有重要作用。基岩山区的地下水流动较为直观，一般与地形坡向一致，同时受地质构造条件控制。比如构造破碎带往往比完整的岩层富水性好，从而会控制当地地下水的流动；又比如地下水在流经岩性界面时往往受阻并以泉水的形式出露。

7. 地下水与地表水有何不同？

构成人类身体的水分子相比我们自身而言“阅历”丰富得多：有些去过南极冰川，有些来自大洋深处，有些曾在大气层边缘游弋，有些则经受了地球深部炼狱般的磨难。要将地球表面的水以地表水和地下水的概念严格分开绝非易事，因为它们各自仅仅是水循环的短暂而局部的表现形态。地表水可以渗透形成地下水，地下水也能够进入河湖和沼泽，成为地表水。

狭义地说：地表水指陆地表面暴露的河流、湖泊和沼泽三种水体，不包括海洋、冰川以及生物水；而地下水则指储存在地表以下20千米以内地层孔隙中的水。地表水是极为活跃且重要的水资源，但资源总量仅为地下水的1%。

地下水和地表水分别处在不同的容器中，这导致了它们的运动形式有鲜明的区别。地表水的运动几乎完全受地球重力场的控制（在湖泊中还要更多地考虑温度场和风的作用）；而地下水的运动则受含水层介质类型和其中的重力场共同控制。较为特殊的是在饱和地下水水面之上的非饱和带，在这个气—水—土三相系统中，表面张力常常取代重力场成为主导因子。地表水流主要出现在坡面、溪流与河川中，运动速度快；而地下水流主要出现在连通性最好的地下含水层中，一般流速极慢。

地表水源于冰川溶解或大气降水，原生的矿物成分较少，在坡面与河道中径流时虽然会溶解一些矿物质，但由于其与岩土接触时间较短，总体来说矿物质含量较低。地下水在出露前往往与含水层中的岩土有长期充分的接触，其化学成分常常受含水层岩性的控制，矿物质含量也通常明显高于同一地区的地表水。在山区进行野外作业时，通过测量溪流沿线的电导率（在某种程度上代表水中所溶解的矿物质含量），即可迅速了解本区域内地下水的排泄情况。

地表水的温度受地表和大气温度控制，必定出现昼夜和季节变化；而地下水的温度受含水层中温度梯度分布控制，几乎从不出现昼夜变化，大型含水层中的地下水温度甚至不随季节变化。所以温度变化也是识别地下水以及评价地下水循环速度的有效指标。

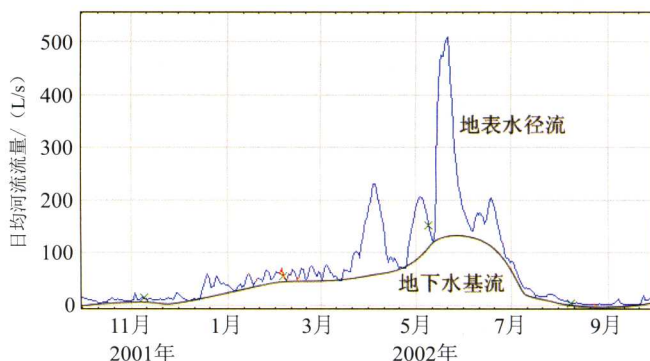
人们对地表水和地下水的科学描述体系也完全不同。地表水的流动几乎永远为紊流状态，常用明渠水动力学描述，而流量为地表水的主要描述参数；地下水的流动多数情况下为层流，一般用达西定律描述，而地下水位是其主要

描述参数。

地下水与地表水之间存在普遍且持续的交换。这种交换不仅限于水量，还包括其他物理、化学、生物以及能量等要素。有时地表水体与饱和含水层直接在接触界面上进行水的交换，但更常见的情况是两类水体通过非饱和的岩土界面进行交换。在前一种情况下，两个相接水体享有共同的水头；而在后一种情况下，两个水体沿着各自独立的水力学轨迹进行运动。

地表水循环速度较快，受地势和雨情影响强烈，水少为患水多亦为患，常需要举国之力治理才能变害为利，为人所用。而地下水则是稳定得多的特殊水资源。它分布广泛，俗话说“山多高，水多高”，即指地下水随地形起伏均有分布，即使离河川湖库较远也可支持社会生活；它循环缓慢，成语讲“井水不犯河水”，即指地下水不随地表水涨落成患成灾，无论丰枯年份都能稳定供水，而且水质良好。人类向更高社会形式进化时，必然尝试摆脱各类资源限制，所以开发地下水资源在人类发展历程中带有必然性。

地表水暴露于地表，极易受到污染，但污染物会在强烈的水循环中被稀释和移除；同时由于生化反应中消耗的溶解氧可以得到快速补充，很多污染物在地表水中的降解速率也相对较快。地下水，尤其是处于排泄区的地下水，则相对较难受到污染。然而，在长期的污染负荷作用下，地下水水质也会逐



某河段流量中，地下水排泄量对河道河流总流量的贡献。可见地下水的流量涨落与地表水相比要平缓得多