

地下水水文学

Groundwater Hydrology

讲授：肖长来

吉林大学环境与资源学院
水文水资源系
2004年9月



第七章 地下水的补给与排泄

7.1 地下水的补给

7.2 地下水的排泄

7.3 地下水径流

7.4 地下水补给、径流与排泄对地下水水质的影响

提要

要求掌握地下水补给来源（降水、地表水、凝结水等）、地下水排泄途径（泉、泄流、蒸发、蒸腾等）、地下水径流特征的基本概念、基本理论和基本方法；地下水补给与排泄对地下水水质的影响；人类活动对地下水水量水质的影响。



7.1 地下水的补给

地下水积极参与水循环，与外界交换水量、能量、热量和盐量。补给、排泄与径流决定着地下水水量和水质的时空分布。

根据地下水循环位置，可分为**补给区**、**径流区**、**排泄区**。径流区是含水层中的地下水从补给区至排泄区的流经范围。

水文地质条件是地下水埋藏、分布、补给、径流和排泄条件、水质和水量及其形成地质条件等的总称。

补给 (recharge) 是指含水层或含水系统从外界获得水量的过程。地下水补给来源主要有大气降水、地表水、凝结水、相邻含水层之间的补给以及人工补给等。

Groundwater recharge is the inflow to a ground water reservoir. GW

补给区 (recharge area) 是含水层出露或接近地表接受大气降水和地表水等入渗补给的地区。



7.1 地下水的补给

地下水的补给、排泄与径流



7.1 地下水的补给

7.1.1 大气降水对地下水的补给

7.1.1.1 大气降水入渗机制 Infiltration (下渗) is slow movement of water through or into the interstices of a soil.

活塞式下渗 (Piston type infiltration): Bodman等人1943~1944年对均质量砂试验后提出。指入渗水的湿润锋面整体向下推进，犹如活塞式的运移。(1) 新水推动老水，(2) 全部补充包气带水分亏缺。

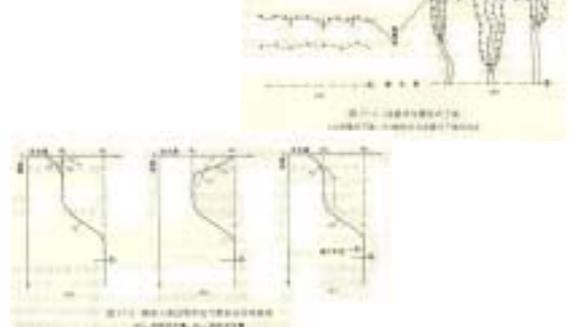
捷径式入渗 (Short-circuit type infiltration): 降水强度较大时，由于岩土质多为非均质，粒间孔隙、集合体间孔隙、根孔、虫孔、裂隙中的细小孔隙来不及吸收全部水分时，一部分入渗的雨水就沿着渗透性良好的大孔道优先快速下渗，并且水分沿下渗通道分向周围的细小孔隙扩散。(1) 新水可超越老水向下运动，(2) 不必全部补充包气带水分亏缺。

砂砾质土以活塞式下渗为主，粘性土中两者兼同时发生。



7.1 地下水的补给

降水入渗机制



7.1地下水的补给

7.1.1.2 降水入渗补给量

降水落到地面，一部分蒸发返回大气层，一部分形成地表径流，另一部分渗入地下。后者中相当一部分滞留于包气带中，构成土壤水；补足包气带水分亏损后其余部分的水才能下渗补给含水层，成为补给地下水的入渗补给量（G）。即

$$G = P - R - E - \Delta S$$

$$\alpha = G/P, \quad \beta = R/P$$

式中G ---- 年降水入渗补给含水层的水量，亦称降水入渗补给量（mm）；

P ---- 年降水量（mm）；

R ---- 年地表径流量（mm）；

E ---- 年蒸发量（mm）；



7.1地下水的补给

ΔS ---- 水量变化量，包括地表水蓄水变量、包气带水分滞留量（水分亏损量）（mm）；

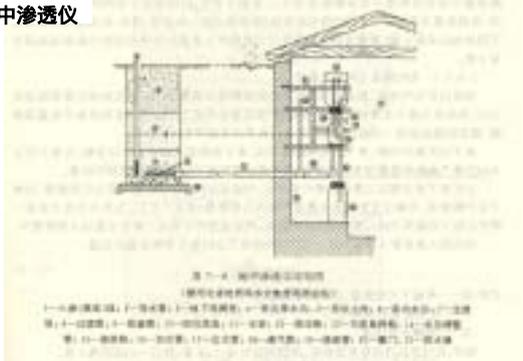
α ---- 降水入渗系数，指补给地下水的那部分水量与相应降水量的比值，一般为0.10~0.40，岩溶地区可达0.3~0.7；降水入渗系数（infiltration coefficient）是某一地区单位面积上降水入渗补给地下水的量与总降水量的比值。

β ---- 地表径流系数。



7.1地下水的补给

地中渗透仪



7.1地下水的补给

7.1.1.3 影响大气降水补给地下水的因素：

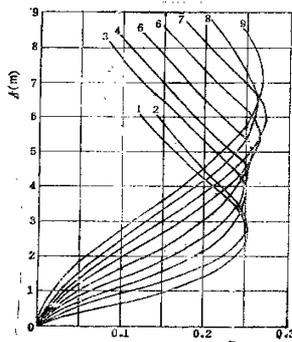
- (1) **年降水量**：降水首先需要补足包气带的水分亏损，因此降水量小时补给地下水的量就小。
- (2) **降水特征**：雨强、雨面、历时都影响入渗，绵绵细雨有利于入渗。
- (3) **包气带岩性**：渗透性强（K大）时，容易补给，渗透性差时不利于补给；厚度（水位埋深）大时消耗于包气带的水分多，不利于补给，而厚度小时有利于补给。
- (4) **地形**：陡坡不利于补给，平缓有利于补给。
- (5) **森林、草地**：有利于补给，而农作物可能减少补给。
- (6) **人类工程**：都市化不利于补给。



7.1地下水的补给

江苏省徐州湖西地区 α -d-P 相关曲线

1—15 < P ≤ 50mm; 2—30 < P ≤ 40mm; 3—40 < P ≤ 60mm; 4—60 < P ≤ 80mm; 5—80 < P ≤ 100mm; 6—100 < P ≤ 130mm; 7—130 < P ≤ 200mm; 8—200 < P ≤ 240mm; 9—P > 240mm
(据曹万金)



7.1地下水的补给

7.1.1.4 大气降水入渗补给量的确定

(1) 平原区大气降水入渗补给量

$$Q_{pr} = \alpha \cdot P_r \cdot F \cdot 10^3$$

式中 Q_{pr} ---- 降水入渗补给地下水量（m³/a）；

P_r ---- 年降水量（mm）；

α ---- 降水入渗系数；

F ---- 补给区面积（km²）。

确定 α 的常用方法：

利用地中渗透仪测定： $\alpha = G/P_r$ 。

利用天然潜水位变化幅度(ΔH)确定： $\alpha = G/P = \mu \Delta H/P$ 。



7.1地下水的补给

(2) 山区降水入渗补给量的确定

可通过测定地下水的排泄量反求其补给量，包括河川基流量（泉流量）、潜流量、开采量、蒸发量等，可以通过基流切割法确定河川基流量。山区入渗系数为

$$a = Q_g / (F \cdot P_r \cdot 10^3)$$

式中 Q_g ---- 年地下水排泄量 (m^3/a)，余同上。



7.1地下水的补给

7.1.2 地表水对地下水的补给----取决于哪些因素？

地表水补给地下水的计算公式为 $Q_{sr} = KIAT \sin \theta$ ，其中 K 为渗透系数， I 为水力梯度， A 为过水断面面积， T 为补给时间， θ 为河水流向与地下水流向之间的夹角，补给量 Q_{sr} 与 A 、 I 、 T 、 K 成正比关系。

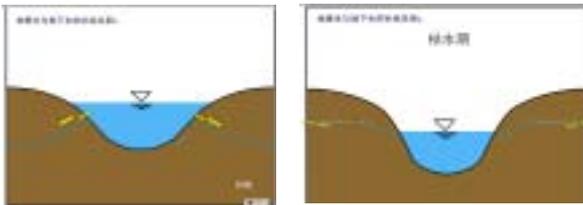
地表水补给地下水时，补给量的大小取决于以下因素：

- (1) 透水河床的长度和漫水周界的乘积（相当于过水断面），过水断面大，补给量就大。
- (2) 河床的透水性，亦即河床岩性的渗透系数，渗透系数大，补给量就大。
- (3) 河水位与地下水的高差，影响水力梯度，水力梯度大补给量就大。
- (4) 河水过水时间，过水时间长有利于河水补给地下水。
- (5) 河水流向与地下水流向之间的夹角。



7.1地下水的补给

地表水与地下水之间的补排关系



7.1地下水的补给

7.1.3 凝结水的补给

凝结作用指气温下降到一定程度由气态水转化为液态水的过程。一般情况下，凝结形成的地下水相当有限。但是，高山、沙漠等昼夜温差大的地方，凝结水对地下水补给很重要。

7.1.4 含水层之间的补给

潜水可以补给承压水，承压水也可以补给潜水。断层、钻孔都有利于补给。多层松散层中含水层通过天窗及越流发生补给。

越流量计算公式：

$$Q_l = FKIT = FK \frac{H_A - H_B}{M} T$$

式中 Q_l ---- 越流补给量 (m^3/a)；

K ---- 弱透水层的渗透系数 (m/d)； M ---- 弱透水层的厚度 (m)；

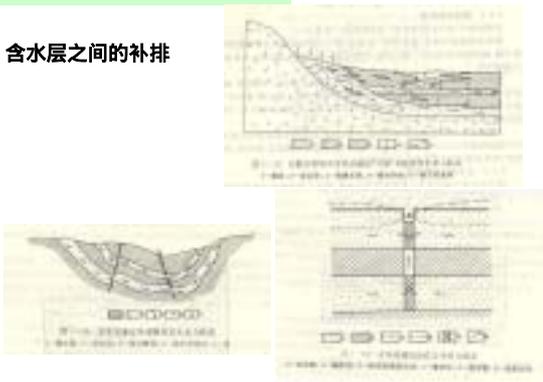
H_A 、 H_B ---- 含水层A和B的水头 (m)； I ---- 水力梯度；

F ---- 越流面积 (m^2)； T ---- 越流时间 (d/a)。



7.1地下水的补给

含水层之间的补排



7.1地下水的补给

7.1.5 地下水的其它补给来源

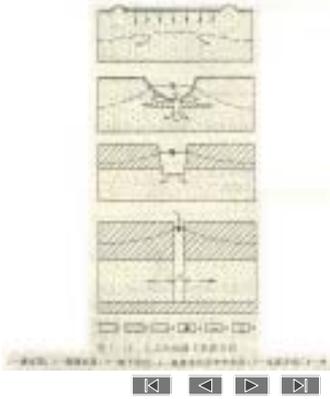
- (1) 水库渗漏。
- (2) 灌溉渗漏：灌溉渠系、灌溉田间渗漏补给。
- (3) 工业及生活废污水的渗漏补给。
- (4) 人工补给地下水 (artificial recharge)：采用有计划的人为措施补充含水层的水量。其目的有：
 - 补充与储存地下水资源，抬升地下水位；
 - 储存热源、冷源；
 - 控制论地面沉降；
 - 防止海水倒灌、咸水入侵；人工补给地下水的方式有：地面，河渠，坑池蓄水渗补，井孔灌注。



7.1 地下水的补给

人工补给地下水的方式

地面
河渠
坑池蓄水渗补
井孔灌注。



7.2 地下水的排泄

7.2.1 泉

(1) 定义：泉 (spring) 是地下水的天然露头。

Spring is a place where groundwater naturally comes to the surface resulting from the water table meeting the land surface. GG

(2) 分类：根据含水层性质可分为上升泉和下降泉；根据出露原因可分为侵蚀泉、接触泉和溢流泉。

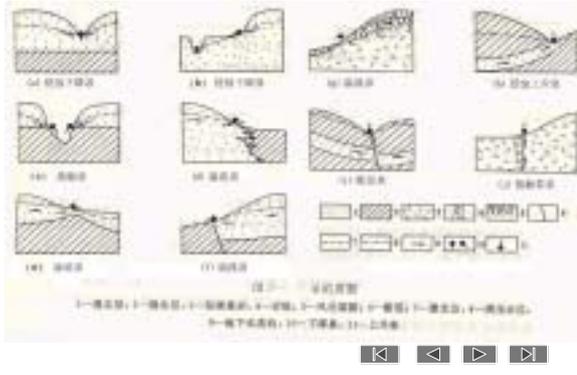
下降泉包括：侵蚀下降泉(a,b)、接触下降泉(c)、溢流泉(d,e,f,g)。

上升泉包括：侵蚀上升泉(h)、断层泉(i)、接触泉(j)。



7.2 地下水的排泄

泉的类型



7.2 地下水的排泄

上升泉 (ascending spring) 是承压水的天然露头。地下水在静水压力作用下上升并溢出地表的泉。

断层泉 (fault spring) 是地下水沿断层带出露的泉。

下降泉 (descending spring) 是地下水受重力作用自由流出地表的泉。

侵蚀泉 (erosional spring) 是沟谷等侵蚀作用切割含水层而形成的泉。

接触泉 (contact spring) 是由于地形切割沿含水层和隔水层接触处出露的泉。

溢流泉 (overflow spring) 是当潜水流前方透水性急剧变弱或由于隔水底板隆起潜水流受阻而溢出地表的泉。

悬挂泉 (季节泉) (suspended spring) 是由上层滞水补给在当地侵蚀基准面以上出露的泉。



7.2 地下水的排泄

间歇泉 (geyser) 是周期性间断地喷发热水和蒸气的泉。

多潮泉 (pulsating spring) 是在岩溶地区的岩溶通道中由于虹吸作用具有一定规律的周期性出流的泉。

水下泉 (subaqueous spring) 是地表水体以下岩石中流出的泉。

矿泉 (mineral spring) 是矿水的天然露头。

温泉 (thermal spring) 是水温超过当地年平均气温而低于沸点的泉。

沸泉 (boiling spring) 是温度约等于当地沸点的地热流体露头。

全排泄型泉 (complete drainage spring) 是排泄泉域内的全部地下水的泉。

部分排泄型泉 (local drainage spring) 是排泄泉域内的部分地下水的泉。



7.2 地下水的排泄

(3) 泉水衰减方程

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \alpha = \pi^2 Kh / 4\mu L$$

式中 Q ---- 泉水流量 (m^3/d) ; Q_0 ---- 泉水最大流量 (m^3/d) ;

α ---- 泉水衰减系数 ; μ ---- 给水度 ;

L ---- 泉域长度 (km) ; t ---- 时间 (d)。

(4) 泉的水文地质意义

- 判明地下水的排泄条件 ;
- 判明含水层特征—环境 ;
- 说明地下水补给条件, 圈定富水区 ;
- 判定山区泉域的含水性、导水性 ;
- 判定泉所在含水层的化学特征。



第七章 地下水的补给与排泄

(5)实例：地形、地质、水文地质条件巧妙地结合形成大泉。

- **济南泉水（泉城）**：2.60km²内有106个泉， $Q_{\max}=5\text{m}^3/\text{s}$ 。
- **广西的地苏暗河**：4.0~489.0 m³/s (F=1000km²)。
- **山西省晋祠泉**：1.90 m³/s，**黑龙洞泉**：4.6~38.5 m³/s (1159km²)。
- **山西省娘子关泉**：13.2 m³/s (1959年)~11.50 m³/s (1977年)，平均12.71 m³/s。
- **山西省大于1m³/s的大泉（群）**有19处，流量97.98m³/s (30.91亿m³/a)，小些的泉（群）有34处，流量10.4 m³/s (3.27亿m³/a)，合计流量108.38m³/s (34.81亿m³/a)。



7.2 地下水的排泄

济南泉群



7.2 地下水的排泄

7.2.2 泄流

泄流是指河流切割含水层时地下水沿河呈带状向河流排泄的现象。可采用断面测流法、水文分割法和地下水动力学法确定。

7.2.3 蒸发蒸腾

7.2.3.1 概念

蒸发包括水面蒸发、土面蒸发和叶面蒸发(蒸腾)，通常统称为蒸发蒸腾、蒸散发。蒸散发量的确定比较困难，可采用水均衡、水分通量等方法确定。

Evapotranspiration [hydrology] is a collective term that includes water discharged to the atmosphere, as a result of evaporation from the soil and surface-water bodies and, as a result of plant transpiration (USGS).



7.2 地下水的排泄

土壤蒸发是土壤中的水分由液态变成气态进入大气的过程，与气候、包气带岩性有关。

地下水蒸发 (Evaporation) 是潜水以气体形式通过包气带向大气排泄水量的过程。**潜水蒸发**是潜水进入支持毛细水带，最后转化为气态形式进入大气的过程。可引起水中及土壤中积盐，产生盐渍化。

蒸腾 (transpiration)指叶面蒸发，指植物生长过程中经由根系吸收水分并在叶面转化为气态水而进入大气中的过程。

Transpiration is the process by which water absorbed by plants (usually through the roots) is evaporated into the atmosphere from the plant surface (principally from the leaves).



7.2 地下水的排泄

7.2.3.2 潜水蒸发经验公式 (阿维里扬诺夫公式)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^n \quad \varepsilon = \mu \Delta H$$

式中 ε ----地下水(潜水)消耗于蒸发与蒸腾的强度(mm/d)；

ε_0 ---- $z=0$ 时水面蒸发强度(mm/d)；

Z ---- 地下水位埋深(m)；

Z_0 ---- 地下水位临界埋深，1~5m；

n ---- 指数，一般 $1 \leq n \leq 3$ ；

μ ---- 水位变动带给水度；

ΔH ---- 由于蒸发蒸腾而产生的地下水位下降值(mm/d)。



7.2 地下水的排泄

7.2.3.3 影响因素

影响潜水蒸发的因素，从而决定土壤与地下水盐化程度的因素：

(1) **气候因素**：干燥、相对湿度小，蒸发强烈，水的矿化度较大；相对湿度较大的地区，由于水交替强烈，水的矿化度通常较小。

(2) **潜水面埋深**：浅则蒸发强烈，一般水位埋深小于2.0m时蒸发量显著增大，而随着水位埋深的增大，蒸发量也明显减弱。

(3) **包气带岩性**：决定土的毛细上升高度和潜水蒸发速度，一般粉质亚粘土、粉砂等毛细上升高度较大、毛细上升速度较快，潜水蒸发最为强烈。

(4) **地下水流动系统**：干旱、半干旱地区的低洼排泄区是潜水蒸发最为强烈的地方。

蒸腾的深度受植物根系分布深度的控制，特点是消耗水分而不带走盐分。蒸腾量的计算是非常困难的。



7.2 地下水的排泄

7.2.4 径流排泄

主要指向相邻含水层的排泄。通常可采用达西公式确定。能否发生径流排泄，取决于两个含水层的水头差。

7.2.5 人工开采

目前，许多地区人工开采地下水已经成为地下水的主要排泄途径。

2000年，中国全国总供水量5531亿 m^3 ，比1999年减少82亿 m^3 。其中，地表水源供水量4440亿 m^3 ，占总供水量的80.3%；地下水源供水量（地下水开采量）1069亿 m^3 ，占总供水量的19.3%；其它水源供水量21亿 m^3 ，占总供水量的0.4%。



7.3 地下水径流

7.3.1 概念

地下水径流是地下水由补给区向排泄区流动的过程。

径流是连接不急于排泄的中间环节，通过径流，地下水的水量和盐量由补给区传送到排泄区，达到重新分配。

7.3.2 径流的指标

方向、强度和径流量。

(1) **径流方向**：地下水的径流方向总趋势是由补给区流向排泄区；由高水位流向低水位。其间由于受到局部地形和含水层的非均一性影响，具体的方向和路径往往复杂，为了掌握地下水的流向，通常通过编制潜水等水位线图或承压水等水压线图来分析确定。



7.3 地下水径流

(2) **径流强度**：含水层的径流强度，也就是地下水的流动速度。其大小与含水层的透水性，补给区与排泄区之间的水位差成正比；与补给区到排泄区之间的距离成反比。对承压水层来说，取决于蓄水构造的开与封闭程度。

(3) **地下径流量**：可用地下径流模数（或称地下径流率）和地下径流系数来表示，地下径流模数（ M ）表示每平方公里含水层面积上的径流量（ $m^3 km^{-2} a^{-1}$ ），其物理意义与表达式和河川径流模数完全一致，其值的大小，可以反映某一地区地下径流量的丰欠程度，所以是评价地下水资源的一个重要参数。

地下径流系数：指同一地区同一时期内的径流深度与形成该时期径流的降水量之比。其值介于0~1之间（在干旱地区，径流系数较小，甚至近于0，在湿润地区则较大）。



7.3 地下水径流

7.3.3 地下水径流的特点：

(1) 地下水径流首先取决于水力梯度，地下水流向总是水力梯度最大的方向。

(2) 径流受岩石透水性的制约。

(3) 水流长城层流运动，流速很小，动能通常不考虑。

(4) 边界对流速影响小，除非边界明显改变了地下水流向和过水断面面积。

7.3.4 径流速度影响因素

径流速度取决于：

(1) 含水层的透水性；(2) 水力梯度；(3) 过水断面面积；(4) 温度；(5) 含盐量。

径流的强弱，影响着含水层水量与水质的形成过程。



7.4 地下水补给、径流与排泄对地下水水质的影响

地下水获得矿化度与化学类型不同的补给水，水质也发生变化。地下水循环可分为两大类，渗入—径流型，渗入—蒸发型。

前者是长期循环的结果，使岩土与其中的地下水向溶滤淡化方向发展，后者长期循环，使补给区的岩土与地下水淡化脱盐，排泄区的地下水盐化、土壤盐碱化。

