

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



第九章 地下水的动态与均衡

提要

要求掌握地下水的动态与均衡的概念、各种情况下的地下水均衡方程式及各项均衡要素的意义和计算方法，能够分析地下水动态形成机制、影响因素及动态类型，了解地下水开发与地面沉降的关系。



第九章 地下水的动态与均衡

9.1 地下水动态与均衡的概念

9.2 地下水动态

9.2.1 地下水动态的形成机制

9.2.2 影响地下水动态的因素

9.2.3 地下水天然动态类型

9.2.4 人类活动影响下的地下水天然动态

9.3 地下水均衡

9.3.1 地下水均衡有关概念

9.3.2 水均衡方程式

9.3.3 人类活动下的地下水均衡方程式

9.3.4 地面沉降与地下水均衡

9.3.5 大区域地下水均衡研究



9.1 地下水动态与均衡的概念

9.1.1 地下水动态

地下水动态 (Groundwater regime) 是指含水层 (含水系统) 地下水与环境相互作用下, 含水层中的地下水水位、水量、水温、水化学成分等要素随时间的变化。它反映了地下水要素随时间变化的状况。

地下水动态要素是随时间变化的地下水水位 (水头)、水量、水温、化学成分等总称。

9.1.2 地下水均衡

地下水均衡 (Groundwater balance, budget) 是指某一时段内某一地段内地下水水量 (盐量、热量、能量) 的收支状况。

Ground water budget is an estimate of water resources usually applied to a groundwater basin or province. Recharge, storage and discharge are important factors in it. Also known as groundwater balance. (Ground water)



9.1 地下水动态与均衡的概念

9.1.3 地下水动态与均衡的关系

地下水资源不同于其它矿产资源的最主要区别, 在于其质和量总是随时间不停变化着。

地下水动态是含水层水量、盐量、热量、能量收支不平衡的结果。

地下水动态表征地下水数量和质量的各要素 (如水位、流量、开采量、溶质成分与含量、温度及其它物理特征等) 随时间而变化的规律, 含周期性、趋势性变化。

地下水动态与均衡关系紧密, 均衡是地下水动态变化的内在原因 (实质), 动态是地下水均衡的外部表现。均衡的性质和数量决定了动态变化的方向与幅度, 地下水动态反映了地下水要素随时间变化的状况。



9.1 地下水动态与均衡的概念

9.1.4 地下水动态与均衡研究的意义

地下水动态与均衡的研究, 有助于 查清地下水补给、排泄与资源条件、含水层之间、含水层与地表水之间的关系; 认识区域水文地质条件; 进行水量和水质评价; 地下水资源合理开发利用与保护管理, 防止地下水危害; 检验水文地质结论。

研究意义具体表现在:

(1) 在天然条件下, 地下水的动态是地下水埋藏条件和形成条件的综合反映, 可根据地下水动态特征分析、认识地下水的埋藏条件、水量、水质形成条件和区分不同类型的含水层;

(2) 地下水动态是均衡的外部表现, 可利用地下水动态资料去计算地下水的某些均衡要素, 如入渗系数、储存量、蒸发量等。

(3) 地下水的数量和质量均随时间而变化, 因此一切水量、水质的计算与评价都必须有时间的概念, 地下水动态资料是地下水资源评价和预测是必不可缺少的依据。



9.1 地下水动态与均衡的概念

水均衡研究实质上是应用质量守恒定律分析参与水循环的各要素的数量关系。目的在于：

阐明某个地区在某一段时间内地下水水量（盐量、热量）收入与支出之间的数量关系；

弄清地下水水量、水质随时间变化的关系；

分析收入、支出项，列出均衡方程，采用相应方法确定有关均衡项；

根据均衡方程可以推知未知项，确定有关水文及水文地质参数。



9.2 地下水动态

9.2.1 地下水动态的形成机制

地下水动态是含水层对环境施加的激励所产生的响应，即含水层将输入信息变换后产生的输出信息。间断性的降水，通过含水层的变换而转化成为比较连续的地下水位/泉流量变化。这是信号滞后、延迟和迭加的结果。



9.2 地下水动态

9.2.2 影响地下水动态的因素

一类是**环境对含水层的信息输入**，包括降水、地表水对地下水的补给，人工开采地下水、地应力对地下水影响等。另一类是**变换输入信息的因素**，即赋存地下水的地质地形条件等。

(1) **气象气候因素**：对潜水动态的影响最为普遍。

降水的数量及其时间分布，影响潜水的补给，从而使潜水含水层水量增加，水位抬升，水质变淡。

气温、湿度、风速等与其它条件结合，影响着潜水的蒸发排泄，使潜水水量变少，水位降低，水质变咸。

气候要素周期性地发生昼夜、季节与多年变化，因此潜水动态也存在昼夜变化、季节变化及多年变化。



9.2 地下水动态

(2) **水文因素**：地表水体补给地下水而引起地下水位抬升时，随着远离河流，水位变幅减小，发生变化的时间滞后，影响距离可达几百米至几千米。

$$\text{影响距离} : l = \sqrt{\frac{Kh_m}{\mu t}}$$

式中 l ---- 影响距离(m)；

K ---- 渗透系数(m/d)；

h_m ---- 含水层平均厚度(m)；

μ ---- 含水层给水度；

t ---- 时间(d)。



9.2 地下水动态

(3) **地质因素**：是影响信息输入变换的因素。降水入渗补给地下水时，包气带岩性和厚度控制着地下水位对降水的响应。水位埋深大、包气带渗透性弱，对降水脉冲的滤波作用就越弱，反之就越强。含水层给水度的大小对水位的升降有明显的影响，相同补给量时，给水度大，水位上升幅度就小，反之水位上升幅度就大。

地震、固体潮对承压水位影响较明显。

水位真变化是有潜水储存量变化而引起的水位变动；**伪变化**是某些并不反映前潜水水量证件的前水位变化。

(4) **人类活动**：通过增加新的补给来源或新的排泄去路，均会较大幅度地改变地下水的天然动态。



9.2 地下水动态

9.2.3 地下水天然动态类型

地下水动态成因类型是根据影响地下水动态的主导因素进行的分类。主要有渗入-蒸发型、渗入-径流型、水文型、渗入-开采型以及多年冻结型和冰雪补给型等地下水动态成因类型。

地下水动态曲线是根据观测点的地下水动态观测资料绘制的地下水水位、流量、水温及水化学成分随时间变化的曲线图。

潜水有蒸发、径流、弱径流型。承压水均属于径流型，动态变化取决于构造封闭条件，开启好、动态变化强烈，水质淡化。



9.2 地下水动态

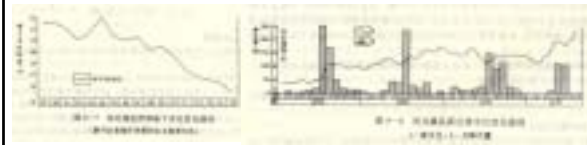
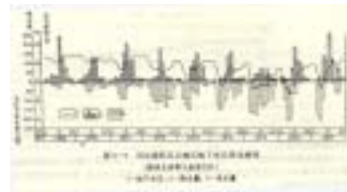
地下水动态类型

类型	出现地区	动态特征
渗入-蒸发型	干旱、半干旱区，地形切割微弱的平原、盆地。	径流微弱，年水位变化小，水质季节变化明显，盐化、土壤盐渍化。大陆盐化水。
渗入-径流型	山区、山前、水位深埋区。	年水位变化大而不均，水质季节变化不明显，水质趋于淡化。
渗入-弱径流型	气候湿润的平原、盆地，地形切割弱。	年水位变幅小，各处接近，水质季节变化不明显，淡化。
水文型	沿江河两岸的条带地段	年水位变化随江河水位变化而变化，但幅度小于江河水位变化幅度。
开采型	城市及集中开采区	水位变化受开采量影响。



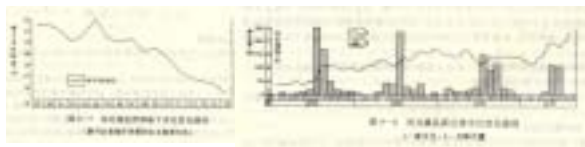
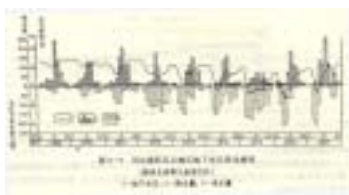
9.2 地下水动态

地下水动态曲线
渗入-蒸发型
灌溉入渗-蒸发型
开采型



9.2 地下水动态

地下水动态曲线
渗入-蒸发型
灌溉入渗-蒸发型
开采型



9.2 地下水动态

9.2.4 人类活动影响下的地下水天然动态

人类活动通过增加新的补给来源或新的排泄去路，而改变地下水的天然动态。钻孔采水、矿坑或渠道排除地下水后，人工排泄成为地下水新的排泄去路，并可能增加新的补给量。若新增加的补给量与新增加的排泄量相等，会出现新的动态平衡。若天然排泄量的减少量与新增加的补给量的增量的和不足以补偿人工排泄量时，将不断消耗储存量，导致地下水位持续下降。

兴建水库、引水灌溉等，增加了地下水的补给来源，导致地下水位上升。在干旱半干旱区会因强烈蒸发而出现土壤盐渍化。

由于人类活动影响，地下水动态类型可能出现人工型（人工开采型、灌溉型等）。



9.3 地下水均衡

9.3.1 地下水均衡有关概念

地下水均衡研究的实质就是应用质量守恒定律分析参与水循环的各要素的数量关系。

地下水均衡是以地下水为对象的均衡研究，目的在于阐明某个地区在某一时间段内地下水水量（盐量、热量）收入与支出之间的数量关系。研究收入、支出项，列出均衡方程式，确定各均衡项，并推求未知项。

Water balance is the balance in a hydrologic system between precipitation or other inputs, and the outflow of water by runoff evaporation, transpiration, groundwater recharge, and stream flow.

均衡期 (balance period) 是进行均衡计算的时间段，可为年、季、月。



9.3 地下水均衡

均衡区 (balance area) 是进行均衡计算所选定的地区，亦即在水均衡计算中和均衡观测工作中所选择的某一基准面以上具有明显边界的水文地质单元或地段。它最好是一个具有隔水边界的完整的水文地质单元。

正均衡 (positive balance) 是某一均衡区内某一均衡期内总补给量大于总消耗量时的水均衡，表现为地下水储存量（热量、盐量）增加。

负均衡 (negative balance) 是某一均衡区内某一均衡期内总补给量小于总消耗量时的水均衡，表现为地下水储存量（热量、盐量）减少。



9.3地下水均衡

水均衡方程 (equation of water balance) 是在某一地区、某一时段内 (天然水) 各补给量总和 (Q_l) 与各消耗量总和 (Q_o) 的差值等于均衡期始末水的贮存量的变化量 (ΔQ) 的关系式; 表示水均衡收入项和支出项关系的方程。即 ΔQ = Q_l - Q_o。

地下水均衡方程 (equation of groundwater balance) 是表示地下水均衡收入项和支出项关系的方程。在研究区内某一时段内某一含水层地下水各补给量总和 (Q_r) 与各消耗量总和 (Q_d) 之差值等于均衡期始末的地下水贮存量的变化量 ΔQ 的关系式。即 ΔQ = Q_r - Q_d。

地下水贮存量变化量 (change in groundwater storage) 是在均衡区内, 在均衡期的起止两时刻的水位变动带内重力水量。通常以土层厚度 (μ ΔH) 计算, 其中 μ 是变动带内岩石的给水度; ΔH 是均衡期水位变化的平均值。



9.3 地下水均衡

9.3.2 水均衡方程式---- (1) 水均衡方程

陆地上某一地区天然状态下总的水均衡, 其收入项 (A) 一般包括: 大气降水量 (P)、地表水流入量 (R₁)、地下水流入量 (G₁)、水汽凝结量 (Z₁); 支出项 (B) 一般为: 地表水流出量 (R₂)、地下水流出量 (G₂)、蒸发量 (Z₂), 均衡期水的储存量变化为 ΔW, 则水均衡方程式为:

$$A - B = \Delta W$$

$$\text{即 } (P + R_1 + G_1 + Z_1) - (R_2 + G_2 + Z_2) = \Delta W$$

$$P - (R_2 - R_1) - (G_2 - G_1) - (Z_2 - Z_1) = \Delta W$$

$$\Delta W = \Delta W_s + \Delta W_a + \Delta W_u + \Delta W_c$$

其中 ΔW 包括地表水变化量 (ΔW_s)、包气带水变化量 (ΔW_a)、潜水变化量 (ΔW_u)、承压水变化量 (ΔW_c)。



9.3地下水均衡

水均衡方程也可写成:

$$P + (R_1 - R_2) + (G_1 - G_2) + (Z_1 - Z_2) = \Delta W_s + \Delta W_a + \Delta W_u + \Delta W_c$$

$$\Delta W_u = \mu \Delta h$$

$$\Delta W_c = \mu^* \Delta h_c$$

式中 μ——含水层的给水度或饱和差;

Δh——均衡期潜水位变化值 (上升为正、下降为负);

μ*——承压含水层的弹性释水系数;

Δh_c——承压水测压水位变化值;

其余符号意义同前。



9.3地下水均衡

(2) 地下水均衡方程

潜水的收入项 (A) 包括降水入渗补给量 (Q_{pr})、地表水渗漏补给量 (Q_{sr})、凝结水补给量 (Q_{zr})、上游断面潜流量 (Q_{gr})、下伏承压含水层越流补给量 (Q_{lr});

潜水支出项 (B) 包括潜水蒸发量 (Q_e, 包括土面蒸发量 Q_{es} 和叶面蒸发量 Q_{et})、潜水以泉方式排泄量 (Q_{sp})、潜水以泄流方式排泄量 (Q_{sd})、下游断面潜水流流量 (Q_{gd})。

则潜水均衡方程式的一般形式为

$$A - B = \mu \Delta h F$$

$$\mu \Delta h = (Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr} + Q_{lr}) - (Q_e + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd})$$

式中 μ——含水层的给水度或饱和差;

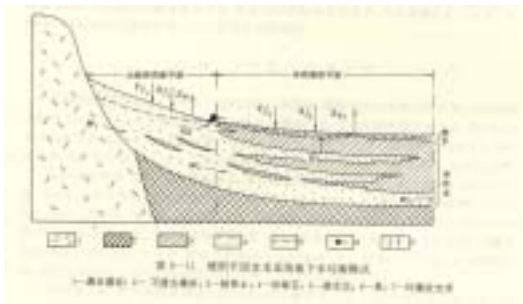
Δh——均衡期潜水位变化值 (上升为正、下降为负);

F——均衡区面积。



9.3地下水均衡

地下水均衡模式图



9.3地下水均衡

在干旱半干旱地区 (平原), 多年情况下有 μΔh = 0, 进而有

$$Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr} + Q_{lr} = Q_e + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd}$$

特别是 Q_{pr} + Q_{sr} = Q_e, 表示潜水的补给量全部消耗于潜水的蒸发量。

在湿润地区 (平原), 多年情况下有 μΔh = 0, 有

$$Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{gr} + Q_{lr} = Q_e + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd}$$

特别是 Q_{pr} + Q_{sr} = Q_{sd}, 表示潜水的补给量全部消耗于径流排泄。



9.3地下水均衡

9.3.3人类活动下的地下水均衡方程式

人类活动下，地下水的收入项增加了灌溉入渗补给量 (Q_{ir} ，包括灌溉渠系补给量 Q_{cr} 和灌溉田间补给量 Q_{tr})、其它方式人工补给量 (Q_{ar})，支出项包括排水沟渠排泄量 (Q_{cd})、人工开采量 (Q_p)、矿山排水量 (Q_{md})，地下水均衡方程为

$$A - B = \Delta Q$$

$$(Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr} + Q_{ir} + Q_{ar})$$

$$- (Q_c + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd} + Q_{cd} + Q_{md} + Q_p) = \mu \Delta h$$

式中A---潜水的收入项；B---潜水的支出项； ΔQ ---潜水变化量。

Q_{pr} ---大气降水入渗补给量，采用降水入渗系数法、水均衡法确定；

Q_{sr} ---地表水渗漏补给量，采用水力学法、断面测流、水均衡法确定；



9.3地下水均衡

Q_{zr} ---凝结水补给量；可采用蒸渗仪等方法确定；

Q_{gr} ---上游断面潜流量，采用达西公式计算；

Q_{ir} ---下伏承压含水层越流补给量，采用越流公式计算；

B---支出项；

Q_c ---潜水蒸发量（包括土面蒸发量 Q_{es} 和叶面蒸发量 Q_{er} ），采用潜水蒸发经验公式、零通量面等方法确定；

Q_{sp} ---潜水以泉方式的排泄量，采用泉水流量观测法确定；

Q_{sd} ---潜水以泄流方式的排泄量，采用水力学法、断面测流、水均衡法确定；

Q_{gd} ---下游断面潜水流出力，采用达西公式计算；

Q_{ir} ---灌溉入渗补给量（包括灌溉渠系补给量 Q_{cr} 和灌溉田间补给量 Q_{tr} ），采用灌溉渗漏系数法、水量均衡法确定；

Q_{ar} ---其它方式人工补给量，采用调查统计法确定；



9.3地下水均衡

Q_{cd} ---排水沟渠排泄量，采用调查及测流法确定；

Q_p ---人工开采量，采用调查统计法确定；

Q_{md} ---矿山排水量，采用调查统计法确定；

ΔQ ---潜水水量变化量。

以上均衡项（均衡要素）的单位通采用 $10^4\text{m}^3/\text{a}$ 或 $10^8\text{m}^3/\text{a}$ 。

μ ---潜水含水层（水位变动带）的给水度，采用抽水试验法、动态分析法、室内实验法确定，无量纲；

ΔH ---潜水水位变化幅度(m)，上升取正，下降取负，依据水位长期观测及调查资料分析确定；

F---均衡区的面积(km^2)。



9.3地下水均衡

9.3.4地面沉降与地下水均衡

大规模开采承压含水层中的地下水，会导致粘性土层压密释水，含水层参数 K 、 μ 、 μ^* 变小，引起地面沉降。粘性土层压密释水量往往占地下水开采量的百分之几十，因此在地下水均衡方程中不能不考虑言行土层的释水影响。



9.3地下水均衡

9.3.5大区域地下水均衡研究

注意上、下游之间，潜水与承压水之间、地表水与地下水之间水量转换与计算。

(1) 堆积平原含水层系统的水均衡方程式为

$$(Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr} + Q_{ir}) - (Q_c + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd}) = \mu \Delta h + \mu^* \Delta h_c$$

(2) 山前平原潜水：

$$(Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr}) - (Q_c + Q_{sp} + Q_{sd} + Q_{gd}) = \mu \Delta h_1$$

(3) 冲积平原潜水：

$$(Q_{pr} + Q_{sr} + Q_{zr} + Q_{gr1} + Q_{ir}) - (Q_c + Q_{sd} + Q_{gd1}) = \mu \Delta h_2$$

(4) 冲积平原承压水：

$$Q_{gr2} - (Q_{gd2} + Q_{ld} + Q_{gd2}) = \mu^* \Delta h_c$$



9.3地下水均衡

9.3.5大区域地下水均衡研究

式中 $Q_{gd} = Q_{gr1} + Q_{gr2}$ 系统内部水量转换量，亦即山前孔隙潜水的侧向径流流出量等于冲积平原孔隙潜水和孔隙承压水的侧向流出补给量之和。

$Q_{ir} = Q_{ld}$ ，为冲积平原含水系统的内部水量转化量，表示孔隙潜水的越流补给量来自孔隙承压水的越流排泄量。各种重复水量，在计算时应特别注意。

