

超采地下水对地质环境影响机理分析

乔光建 檀领革

(邢台水文水资源勘测局, 河北 邢台 054000)

摘要 通过对邢台市平原区含水层系统水文地质特征分析, 研究超采地下水对地质环境的影响, 如地面沉降、咸水界面下移等。制定出控制开采地下水的措施, 为今后恢复地下水生态环境提供参考依据。

关键词 超采地下水 地质环境影响 邢台市平原区

中图分类号: P641.74 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)S2-0074-04

1 邢台市平原区含水层系统水文地质特征

邢台市平原第四系含水层, 由于受不同地质历史时期的古气候、古地理沉积环境及新构造运动等因素控制, 含水岩层在不同深度的分布形态和发育程度, 均存在着差异, 并导致了它们的水力性质、水化学、渗透性、赋水性及地下水动态等水文地质条件发生相应变化。因此, 本文以第四纪沉积物为基础, 以水文地质条件为依据, 将邢台市平原第四系含水岩系自上而下划分为 4 个含水层组。

第一含水组为潜水。底板埋深 40 ~ 60 m, 局部沿小漳河古道有埋深 60 ~ 70 m 的条带。滏东区有咸水分布区, 浅层淡水系漂浮在咸水层上的淡水体, 它的分布受南西 ~ 北东向的古河道控制, 沿清凉江、索泸河、卫运河沿线地带, 含水层以细砂为主、松散质均、透水性好, 底板最大埋深 60 m, 富水性 $2.5 \sim 10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 其余地区浅层淡水底板埋深较小, 含水层以粉砂、粉细砂为主, 除少数岛状富水区单位出水量达 $2.5 \sim 5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 其余大部分地区小于 $2.5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 。宁晋东部水位埋深 20 m 左右, 南宫、清河西南部, 临西及威县的东南部水位埋深 10 ~ 20 m, 其余地区水位埋深 2 ~ 7 m, 水位年变幅一般在 1 ~ 3 m, 局部地区小于 1 m, 地下水动态类型为降水入渗补给 ~ 蒸发、开采型。该区由于受地下水补给、径流、排泄条件及气候等的影响, 水化学类型复杂, 咸水多呈孤岛、条带状零星分布, 矿化度一般在 1 ~ 3 g/L, 部分 3 ~ 5 g/L, 局部大于 5 g/L。浅层淡水和下伏咸水之间多没有严格的隔水层, 直接接受降水补给及地表水体渗透补给, 在河道带影响范围内, 淡水

体靠其渗透压力和淡化作用, 使其嵌入咸水层中。在远离河道带, 浅层淡水漂浮于咸水层上, 厚度较小, 故浅层淡水呈波状与咸水接触, 且接触面随季节变化而稍有变化。

第二含水组为潜水 ~ 承压水。按其岩性和沉积特征, 可分为两个亚组, 第一亚组底界面 100 ~ 180 m, 主要是咸水分布段, 其局部薄层淡水是和第一含水层组连在一起的。咸水底界由西向东加深, 基本与该亚组底界一致, 只有在咸水区的西北部, 宁晋县东汪、艾辛庄, 新河县王府一带有咸水、淡水、微咸水、深层淡水交替接触的现象, 咸水的最大深度达 240 ~ 260 m, 形成独特的咸水凹槽。第二亚组为咸水层下的承压淡水。含水层岩性为: 平乡县高阜镇、巨鹿县城到南宫市杜村、大屯以西为中细砂, 以东分布为粉细砂, 含水层厚度在巨鹿、广宗一带有环形沉积规律, 沉积厚度 10 ~ 20 m, 新河南部、南宫中部以及东南部、临西东部、清河西部及北部亦为 10 ~ 20 m, 清河东部小于 10 m, 其余均大于 20 m, 富水性在南宫市东南部、清河大部地区小于 $2.5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 宁晋县司马、四芝兰、百尺口一带在 $15 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 以上, 其余地区为 $2.5 \sim 10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 。

第三含水组为承压淡水。自滏阳河至老沙河、索泸河一带地板埋深 340 ~ 380 m, 含水层为亚砂土、中细砂, 厚度一般 20 ~ 40 m, 除宁晋、新河两县富水性较好外, 其余多在 $5 \sim 10 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 只在巨鹿县苏家营、王虎寨、张家町一带富水性小于 $5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 清凉江 ~ 索泸河以东地板埋深 370 ~ 420 m, 南宫市段芦头至威县白果树一带, 以及清河县南部、临西县老官寨至尖冢地带富水性 $2.5 \sim 5 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$, 其余为

5~10 m³/(h·m),宁晋、新河两县水位埋深 28 m 左右,矿化度小于 2 g/L,其余地区水位埋深 30~60 m,最大埋深 73.8 m(南宫),平均水位埋深 39 m,水位年变幅 3~6 m,矿化度一般小于 1 g/L。

第四含水组为深部承压水。含水层以中细沙及细沙为主,系厚层黏土压黏土与含水沙层交替沉积,风化与胶结程度较高,渗透性及赋水性均较弱。由于上覆层及含水层之间为厚层黏土,又远离补给区,故侧向径流补给微弱。滏东区底板埋深 520~580 m,单井出水量一般为 5~10 m³/(h·m)。含水层厚一般在 20~40 m 之间。

在地下水未被大量开采的情况下,山前平原第一、第二含水层组,中部平原咸水体较薄的第一、第二含水层组,浅层淡水发育地区的第一含水层组以及冲积扇顶部的第二、第三含水层组的多年水位动态变化基本上与降水过程有同步变化趋势,属于降水入渗补给-蒸发径流排泄型;其他地区的第二、第三、第四含水层组则以径流补给-顶托排泄型与径流排泄型为主。

在地下水被大量开采情况下,山前平原的第一、第二含水层组与东部平原含水层组的多年动态变化基本与降水过程同步,属于降水入渗-径流开采型;其他区域的第二、第三、第四含水层组的多年水位动态基本呈波状逐年下降趋势,动态类型属于径流越流补给-开采型。

2 各含水层岩性及含水量

2.1 砂土分类

土按照颗粒大小和性质分类:一级分类是按土中大于 0.1 mm 的黏土所占的百分数,把土分为粗粒土和细粒土两大类;土样中大于 0.1 mm 的土粒重量超过土样总重量的 50% 的土属于粗粒土,反之为细粒土。二级分类是对粗粒土按粗粒组(颗粒大于 0.1 mm)、中砾石(颗粒大于 2 mm)组的含量进行划分为砾石类土和砂类土,对细粒土划分为高塑性土、中塑性土和低塑性土。按照地质常用砂土名称的粒径和粒径占全重的百分数见表 1。

表 1 含水层砂土分类

土的分类	粒径/mm	颗粒占全重百分比/%	土的分类	粒径/mm	颗粒占全重百分比/%
砾砂	>2	25~50	细砂	>0.1	>75
粗砂	>0.5	>50	粉砂	>0.1	>75
中砂	>0.25	>50			

2.2 砂土的物理性质

土的界限含水量:黏性土由于所含水分而表现为不同的状态,土由一种状态转入另一种状态时的

分界含水量称为土的界限含水量,土体含强结合水,土体积和形状维持不变时为固体状态;土体含强结合水及部分弱结合水,土形状不变,但体积可因水分减少而收缩,此时为半固体状态;土体含大量弱结合水,甚至一部分自由水,土在外力作用下可塑成任何形状而不生裂纹,此时为压塑状态;土体含大量自由水,呈泥浆状,易流动,此时为流动状态。

土的压缩性:土在压力作用下体积减小的特性叫做压缩性。土体积的减小主要是由于孔隙的压缩造成的。孔隙比用土中孔隙所占体积与土粒所占体积的比例,不同土的孔隙比不同。

2.3 含水层的发育程度

根据大量钻孔土层粒度与含水层岩性统计资料分析,在山前平原,第四系岩性自上而下由细、粗、较细,构成了一个较完整的沉降回旋。反映了第四纪以来,径流弱、强、较弱的变化过程。在东部平原区,由于径流变化不甚明显,第四系含水岩系从上至下由数个粉砂、细砂、中砂、粗砂岩性变化段构成。

不同岩性含水层出水率:根据大量岩性单一的开采井与分层钻孔的抽水试验资料^[1],用统计法归纳出邢台市平原区不同水文地质区,不同含水层组的不同岩性的出水率,即平均 1 m 含水层的单井涌水量,可间接反映出含水层的透水性。总的来看,随着深度的加大,同种岩性的出水率值逐渐减小。表 2 为邢台市平原第四系含水组含水层经验出水率。

表 2 邢台市平原第四系各含水组经验出水率 %

岩性	第一含水组	第二含水组	第三含水组	第四含水组
粉砂	0.26~0.34	0.14~0.17	0.10~0.12	0.05~0.065
细砂	0.25~0.38	0.19~0.25	0.17~0.23	0.08~0.10
中砂	0.53~0.61	0.30~0.36	0.28~0.36	0.11~0.12
粗砂	0.60~0.81	0.40~0.50	0.40~0.46	0.14~0.16
砾砂	无资料	无资料	无资料	无资料
卵石	无资料	无资料	无资料	无资料

从各含水层单位涌水量资料分析,粗砂土层中含水量最大,而各个含水层比较,第一含水组土层含水量最大。饱和土承受上部压力,水分和土体作为一个整体承受压力,形成相对平衡。当水被抽走以后,土产生压缩,水体充塞的空间也被压缩,形成地面沉降。

3 超采地下水对地质环境影响

在邢台市黑龙港区和滹沱区,由于长期大面积过量开采地下水,对地下水水环境产生一定的影响,引发了地下水水位大幅度下降、降落漏斗快速扩展、含水层疏干、地面沉降、咸水底界面下移等环境地质问题。

3.1 越流补给深层地下水造成含水层疏干、咸水界面下移

在邢台市黑龙港和滹沱区的咸水区,由于长期超采深层地下水,改变了深层地下水水流的补给、排泄的自然状态。在 20 世纪 70 年代深层地下水开采初期,开采量较小,深层水头和浅层水头基本接近,深层水水流的流场的补给区、径流区、排泄区基本保持自然状态。机井开采量基本以截取水平径流、削减自然排泄为主,即以地下水侧向径流构成开采资源的主要成分。随着大规模开采地下水,原来地下水流的侧向径流不能满足开采需求,造成深层地下水位大规模持续下降。由于深层淡水不断开采,其深层地下水的水位不断下降,从而浅层地下水向深层地下水的越流量逐年增多。在全淡水区、深、浅层地下水混合开采,越流补给是正常补给过程。在有咸水区的区域,咸水越流补给地下水,会造成咸水界面下移,对水质产生影响。

越流量可按达西定律计算。计算公式为

$$Q_{\text{越}} = 100 F \varepsilon \Delta h \Delta t$$

式中: $Q_{\text{越}}$ 为越流补给量,万 m^3/a ; F 为计算面积, km^2 ; ε 为越流系数(采用 1.92×10^{-5}); Δh 为浅层地下水与深层地下水的平均水位差, m ; Δt 为计算时间段。

越流补给量计算结果:滏东区越流量为 30 124.8 m^3/a ,其中黑龙港淡水区 9 092.9 万 m^3/a ;黑龙港咸水区 18 823.3 万 m^3/a ;滹沱区咸水区 2 208.6 万 m^3/a 。

邢台市东部平原区有咸水或微咸水分布,地下水位埋深一般小于 15.0 m ,属于浅层咸水。在垂直方向上,咸水主要赋存于第四系的第一和第二含水层组,咸水底界由西向东逐渐加深,下伏为深层淡水,上覆有浅薄层淡水或无淡水覆盖。

由于人工开采地下水,原始状态下的深层承压水的补给区、径流区、排泄区消失,地下水水流从补、经、排的循环型承压水流变为开采条件下的下渗、消耗型承压水流。造成深层水头与浅层水头地下水位高达几十米的水头差,为上部咸水补给下部淡水提供了必要的动力条件,上层水对下水层的越流补给,使咸水底界面整体缓慢下移。

越流补给是咸水底界面下移的主要因素,其结果使淡水储存条件受到影响,含水层结构受到破坏,形成该区水资源的恶性循环,最终将深层淡水资源破坏。以新河县为例,该县总面积 366 km^2 ,浅层地下水原来水文地质构造情况为:底部埋深 30 m 的淡水面积仅 29.6 km^2 。埋深 10 m 左右的微咸水面积 40.2 km^2 ,含水层厚度 3 ~ 5 m ,主要分布在河道和沙丘地带。咸水分布较广,面积 296.2 km^2 ,埋深在 30

~ 50 m 之间。该县生活用水主要开采深层淡水,近年来,随着深层淡水开采量增大,浅层咸水与深层淡水水位差逐渐增大,导致咸淡水界面下移,有的下移界面超过机井对上层咸水封闭层的深度,淡水的储存条件受到破坏,使原来的淡水井变成咸水井,影响居民生活用水。通过对新河县咸水区咸水界面下移情况调查,如新河县苏章村,1998 年 6 月对地下水水质分析结果为:总溶解性固体 870 mg/L ,氯化物为 180 mg/L ,而 2002 年 10 月化验结果为:溶解性总固体质量浓度 1 200 mg/L ,氯化物为 424 mg/L 。2002 年监测结果与 1998 年结果相比较,溶解性总固体浓度增大 37.9%,氯化物浓度增大 135.5%,说明咸水界面下移对水质影响明显。

3.2 压密释水造成地面沉降

地面沉降是由于过量的开采第四系松散地层中的地下水而引起的。当地下水开采量大于补给量时,含水层的承压水位明显下降。随着承压水头的不断下降,造成了黏性土层的不断密结而大量压缩;同时,含水层本身由于承压水位的下降,水对于上层的浮托减小,因而产生压缩。黏性土层和砂层因承压水位不断下降造成的密结和压密,反映在地面上就是地面沉降。地面沉降的发生与发展是由承压含水砂层及其上覆黏性土层中孔隙水压力减小、有效应力增加而引起的。根据质量守恒原理,土层在饱和水状态下,土体体积的减小应等于土层孔隙水释放量,也就是说,单位面积上土层厚度减少一个单位,则等于土层释放一个单位体积的水,即:

$$Q_{\text{压}} = 0.1 \Delta h F$$

式中: $Q_{\text{压}}$ 为土体压密释水量,万 m^3/a ; Δh 为地面沉降深度,采用平均值 23 mm/a ; F 为计算面积, km^2 。

则压密释水量计算结果为 13 068.6 万 m^3/a ,其中黑龙港区 11 348.2 万 m^3/a ,滹沱区 1 720.4 万 m^3/a 。

土层压缩是造成地面沉降的主要因素,根据黑龙港区观测资料分析,地面沉降的分布与地下水位降落漏斗范围相同,地下水位下降漏斗发展迅速,漏斗面积大,则该区地面沉降显著。根据 1958 ~ 1988 年对该区地面沉降测定,年平均沉降率为 22.78 mm/a 。1988 年以后由于该区地面沉降资料短缺,河北省水文水资源勘测局根据地下水位、地下水开采量、地面的固结程度、黏性土的含量等因素,采用 4 种不同的预测方法对该区地面沉降进行预测:该区形成以南宫为中心的地面沉降带,与深层地下水水位降落漏斗中心一致。预测 1989 ~ 1998 年南宫沉降区年沉降量为 33.94 mm ,到 2030 年该区年平均沉降量为 61.85 mm ^[2]。

地面沉降的危害还表现在降低了地面高程,可能引起排水不畅,降低了河道输水能力。对建筑物

引起裂缝以及地下各种管道发生扭曲甚至断裂,是一种发展缓慢但破坏巨大的环境地质灾害。

3.3 现状开采条件下水量均衡分析

在黑龙港区和滹滏区,由于浅层咸水分布较广,主要以开采深层地下水为主。深层地下水的排泄途径,在 20 世纪 70 年代以前,主要是径流排泄,表现为局部地区的人工开采或向上部含水层的越流,70 年代以后,大量开采地下水,人工开采则成为深层地下水的排泄途径,以消耗存量为主。储量消耗的显著特点是地下水位持续下降,目前所抽取的水量一部分来自补给区外,大部分来自含水层本身所储存水的释放,包括来自含水层及附近的粉土或黏土夹层的压密。在超采情况下,深层地下水开采量主要有 4 部分水量组成^[3]。

$$Q_{\text{开}} = Q_{\text{侧}} + Q_{\text{越}} + Q_{\text{弹}} + Q_{\text{压}}$$

式中: $Q_{\text{开}}$ 为深层地下水的开采量,万 m^3/a ; $Q_{\text{侧}}$ 为来自侧向流入量的增量,万 m^3/a ; $Q_{\text{越}}$ 为来自外系统的越流量的增量,万 m^3/a ; $Q_{\text{弹}}$ 为含水层释放量,万 m^3/a ; $Q_{\text{压}}$ 为上覆弱透土层黏性土的释水量,万 m^3/a 。

在以上补给量中,弹性释水和压密释水两部分补给水量,是承压含水层组在开采外力破坏其内部水动力场条件之后,内部水动力场为达到新的平衡而进行的内部水量空间上的再分配结果。深层地下水自然补给水量主要有侧向补给和越流补给^[1]。浅层和深层地下水水位差形成越流补给,在浅层为咸水的区域,越流补给的水量为咸水,会使深层地下淡水受到破坏,形成咸水界面下移等地质灾害。

在深层地下水开采中,弹性释水、压密释水和越流补给是承压含水层组在开采外力破坏其内部水动力场条件之后,内部水动力场为达到新的平衡而进行的内部水量空间上再分配的结果,与自然补给过程之间存在本质的区别。压密释水是以牺牲地面高程而获得的水量,其结果导致地面沉降,在咸水区,上层咸水越流补给导致咸水底界面下移。弹性释水大量开采造成地下水位下降,地下漏斗区扩大。长期超采地下水引发了地下水水位大幅度下降、降落漏斗快速扩展、地面沉降、咸水底界面下移等水危机和环境问题。表 3 统计了现状开采条件下深层地下水对生态环境影响情况。

表 3 现状开采条件下深层地下水对环境影响比例结构

补给方式	补给量/ 万 m^3	占总量 比例/%	对地质生态环境的影响
侧向补给	1 883.9	3.86	
越流补给	30 124.8	61.70	在咸水区,造成咸水界面下移
弹性释水	3 717.3	7.62	地下水位下降,漏斗区扩大
压密释水	13 068.6	26.80	含水层疏干,地面沉降
合 计	48 794.6		

综上所述,开采深层地下水得到的水量主要来自由于水位下降而引起的含水层和弱透水土层压密、水体膨胀引起的弹性释放、侧向补给和越流补给,来自土层压密和弹性释水的水量均是动用储存量。在承压含水层以上有咸水覆盖的地区开采的淡水量也是动用储存量,只有在无咸水覆盖的地区部分越流补给的水量来自浅层地下水,这部分水量虽然可以持续利用,但属于浅层水和深层水资源量的重复量。远离山前黑龙港平原的侧向补给占总补给量的 3.86%,由于地下水开采水位下降而引起的侧向补给实际上也是动用邻区的地下水储存量。目前,开采的深层地下水除侧向补给和在无咸水覆盖区的越流补给的水量外,几乎全部动用储存量。

目前人们超采的深层地下水,不仅仅是几百年、几千年留下的地下水,而是几万年以来留给我们的地下水,邢台市黑龙港区咸水区的咸水体之下蕴藏的深层淡水,补给量非常缓慢,其循环周期一般在 1 万~2 万 a,是用于维持生态环境免遭破坏的生态环境用水。目前,超采的深层地下水,是以牺牲环境为代价支撑经济发展的,这种用于维持生态环境的水愈少,生态环境愈差。

4 措施和建议

为防止生态环境进一步恶化,可根据国家法律严格控制开采深层地下水。为解决农业缺水问题,可通过调整农业结构、采取综合措施提高水的利用效率。邢台市属于资源型缺水地区,只有坚持开源节流与保护并重,才能缓解供需矛盾和实现水资源的可持续利用。所以在节流的前提下,适当开源是完全必要的,从现状来看,一方面是充分发挥现有的各种引蓄水工程的作用,包括引黄工程和汛期拦蓄雨洪水等方法,实现优化调度。实施南水北调中线工程,是解决该区水资源水危机的根本措施,为了限制超采地下水,邢台市首先在全市范围内开展了关停城市自备井工作,根据用水户对不同水质的用水需求,对水资源进行合理配置,采取联合调度地表水和地下水,先用地表水,后用地下水的办法,对于公共供水管网覆盖范围内的生活饮用水的自备井、公共供水能够满足用水需求的其他用户的自备井,于 2005 年年底前全部关停,并且不再审批开凿新的自备井;对于公共供水不能满足用户需求以及公共供水管网覆盖范围以外的自备井,实行总量控制、定额管理、限量开采、强化监控,并随着公共供水管网的延伸,适时关停,对于偷采、滥采、无证取水等非法用户的自备井,坚决予以关停;对于外迁、停业和破产的自备井,按照有关程序和技术要求关停^[4-5]。(下转第 81 页)

物在恢复初期水草不被牧食。鱼类、螺类的新陈代谢可促进水体中溶解态氮磷含量增加,同时促进沉水植物的生长。

5.4 降低水位

湖泊水位的提高将影响沉水植物的光合作用,当水深超过沉水植物的光补偿深度时,沉水植物将因不能进行光合作用而死亡,所以水位提高到一定深度对水生植物的影响是致命的也是迅速的,在一周内沉水植物可能死亡。在有调控条件的情况下,改善沉水植物的光合作用条件,是恢复沉水植物的有效措施。

5.5 采用软围隔营造静水环境

在小型湖泊的局部水域中采用软围隔消浪,可以有效营造静水环境,防治因风浪影响而引起的底质悬浮等不良作用。

6 结 语

富营养化湖泊中水生植物修复的主要目的是通过水生植物促进生态系统的自净能力和良性循环,通过分析水生植物对水中氮、磷等营养元素和污染物的吸收及分解作用,可选择不同的水生植物及其组合来适应不同的受污染水体。还可通过控制水生植物的数量来调控净化能力的大小,以修复受污染水体并保持水质。

利用水生植物控制湖泊富营养化有多种优势:成本低,能耗小,对环境扰动小,植物资源可回收再利用,并获得一定经济效益,有较高美化环境价值,利于整体生态环境的改善。因此进行水生植物恢复来协助治理湖泊具有广阔的应用前景。根据我国湖泊富营养化发展的现状与原因,恢复和重建水生植被以提高湖泊自身的自净能力是解决湖泊富营养化和实现湖泊资源可持续利用的关键。

参考文献:

[1] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2版.北京:中国环境科学出版社,1990:100-101.
[2] YANG Q X,LI W C. Environmental changes since foundation of Pen-Fish-Farming in east Taihu lake[J]. China Environmental Science ,1996 ,16(2):101-106.
[3] YANG Q X,LI W C. Effects of high density Pen-Fish-Farming on aquatic macrophyte and its countermeasure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology ,1996 ,7(1) 83-88.
[4] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等.水生植物对富营养化水体水质净化作用研究[J].武汉植物学研究,2001,19(4):299-303.
[5] 苏胜齐,姚维志.沉水植物与环境关系评述[J].农业环

境保护 2002 21(6):570-573.

[6] SOMES N L G ,BREEN P F ,WONG T H F. Pre-prints of the 5th inter-national conference on wetland system for water control[M]. Vienna :University Bo-den-kulture Wien ,1996 :1-8.
[7] 成水平,吴振斌,夏宜琚.水生植物的气体交换与输导代谢[J].水生生物学报,2003,27(4):413-417.
[8] VANDENBERG M S ,COOPS H ,MEIJER M L et al. Clearwater associated with a dense chara vegetation in the shallow and turbid lake veluwemeer ,the netherlands[J]. Ecolog-ical Studies ,1998 ,131 :339-352.
[9] CARPENTERT ,KITCHELL J F. The temporal scale of limnetic primary production[J]. Am Nat ,1986 ,129 :417-433.
[10] 金相灿,颜昌宙.太湖北岸湖滨带观测场水生植物群落特征及其影响因素分析[J].湖泊科学,2007,19(2):151-157.
[11] CARPENTER S R ,LODGE D M. Effects of submerged macrophytes on ecosystem processes[J]. Aquat Bot ,1986 ,26 :341-370.
[12] 童昌华.水体富营养化发生原因分析及植物修复机理的研究[D].杭州:浙江大学,2004.
[13] 缪绅裕,陈桂珠.人工湿地中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J].生态学报,1999,19(2):236-241.
[14] 刘伟龙,胡维平.西太湖水生植物时空变化[J].生态学报,2007,27(1):159-170.
[15] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001.

(收稿日期 2007-07-10 编辑 舒建)

(上接第 77 页)

在南水北调中线工程实施前,要通过强化节水和推进合理用水,使地下水超采状况有所控制。在咸水覆盖区,越流补给的咸水会破坏地下淡水储水条件,应采取措施停止深层地下水开采。在南水北调实施后,一般年份城镇要全部禁采地下水,并在全部供水区范围内限制超采地下水,干旱年地下水与南水北调来水联合运用应急,从而使地下水位逐步恢复到合理状态,使生态环境逐步恢复,实现良性循环。

参考文献:

[1] 陈望和.河北地下水[M].北京:地震出版社,1999:42-43.
[2] 张光辉,王金哲.海河流域中东部平原地下水补给与释水机制探讨[J].水文,2002(3):5-9.
[3] 王巧平,李明良,卢胜勇.河北省京津以南平原区地面沉降预测研究[J].南水北调与水利科技,2002(2):27-30.
[4] 乔光建,张均玲.邢台市平原区地下水环境问题分析[J].水资源保护,2002(4):21-24.
[5] 乔光建,张均玲.邢台市地下水环境现状和保护对策[J].水资源保护,2003(1):52-54.

(收稿日期 2007-04-30 编辑 高渭文)