6 地下水环境影响评价

6.1 现场条件与参数调查

地下水环境影响评价涉及较为详细的项目区和周边地区地质、水文地质条件的调查与分析。但现有数据资料十分有限，难以满足地下水环境影响评价模型建模与识别的要求。鉴于此，本次环评相继开展了评价区水位调查、水文地质勘察、非饱和带渗水试验、含水率和水份特征曲线测定等工作，工作布局见图 6－1。

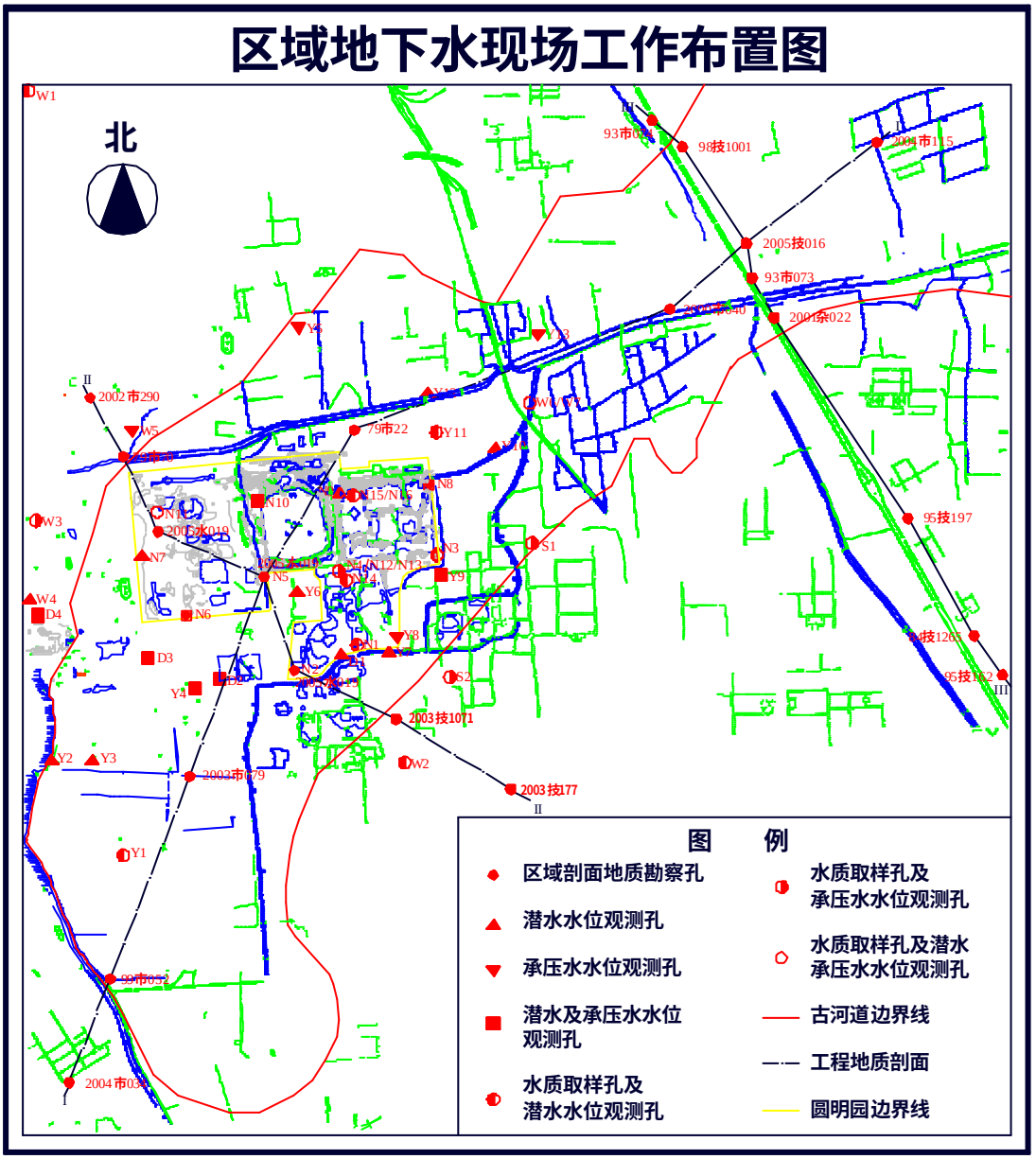


图 6－1 现场条件与参数调查工作布置图

6.1.1 现场勘测

评价区内布置钻孔 16 眼，钻孔布置见附件（圆明园防渗工程区水文地质勘察报告）。

1） 勘测观察孔（9 眼）

- 深井（6 眼，孔位编号 2#、5#、6#、8#、10#、11#）：揭露至第一承压含水层底板，分别观测潜水及承压含水层水位；
- 浅井（3 眼，孔位编号 1#、3#、7#）：揭露至潜水含水层底板，观测潜水含水层水位，采集地下水水质分析样；

2）抽水试验孔（2 眼）及抽水试验观测孔（5 眼）

- 承压含水层抽水试验井（1 眼，孔位编号 4#）：揭露至第一承压含水层底板，分层观测水位，下管，作为长观孔保留。配套抽水试验观测孔 3 眼，其中承压水观测孔 2 眼（编号为 O1#、O2#），潜水观测孔 1 眼（编号为 O3#）；
- 潜水含水层抽水试验井（1 眼，孔位编号 9#）：揭露至潜水含水层底板，观测潜水含水层水位。下管，作为长观孔保留。配套抽水试验观测孔 2 眼（编号为 O4#、O5#）。

6.1.2 非饱和带和湖底渗流参数现场试验

非饱和带和湖底渗流特性评价与参数确定是本次地下水环境影响评价的主要部分。为此，现场开展不同区域和环境条件下的非饱和带和湖底渗流参数现场试验，工作布局参见表 6－1 和图 6－2。

6.1.3 地下水位与水质监测

充分利用现有观测井点，兼顾工程项目区上下游地下水流场特性，结合潜水和承压含水层空间展布，在评价区布置潜水位监测点 21 个，其中项目区 11 个，周边地区 10 个；承压水位监测点 12 个，其中项目区内 7 个，周边地区 5 个。

地下水水质分析样 14 个，其中项目区内 9 个，周边地区 5 个；潜水水质分析样 10 个，弱透水层水质样 2 个，承压水质样 2 个。

按照《地下水质量标准》（GB/T14843-93）（1993），结合地下水环境影响评价要求指标确定本次地下水质样品的分析指标。

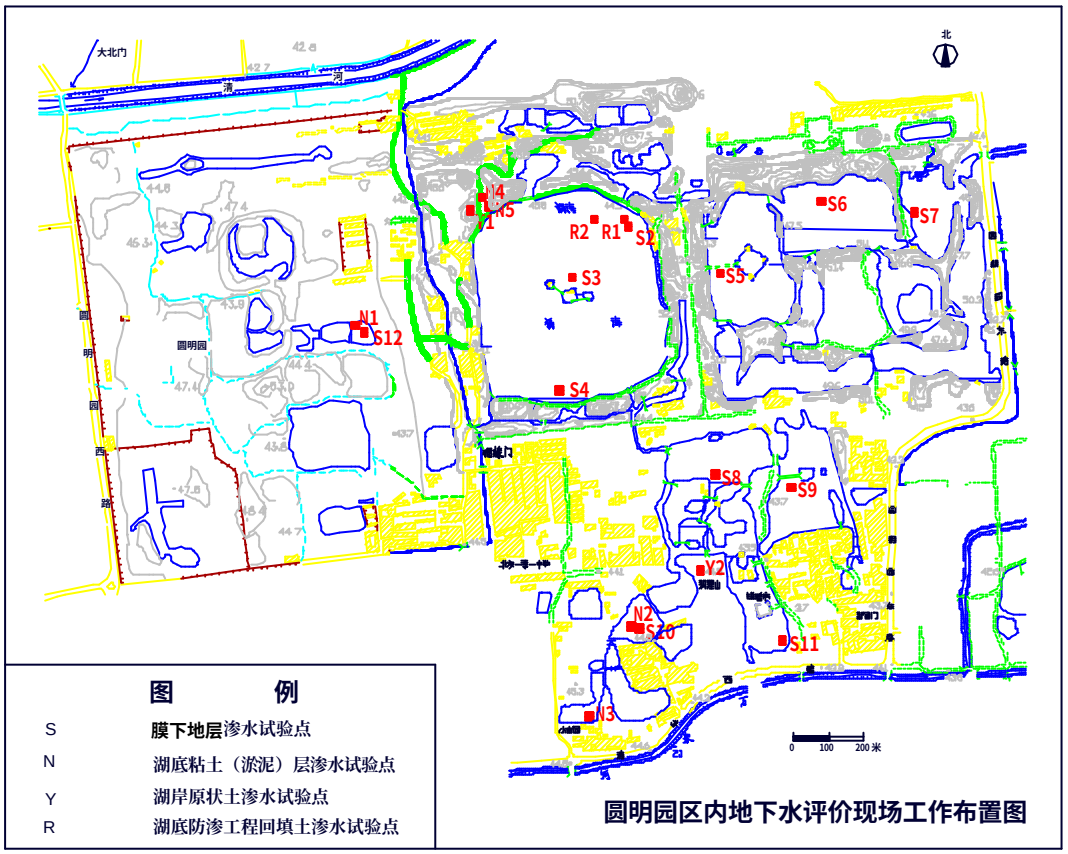


图 6－2 圆明园区渗透性能试验点位置分布图

表 6－1 非饱和带和湖底水力学参数现场试验工作汇总

编号	内容	试验点数	备注
1	水分特征曲线	13	①防渗层下部地层 ②陆面地层
2	双环渗水试验	21	①防渗层下部地层 ②湖底原底泥层； ③陆面地层
3	含水率监测点	17	
4	观测点高程测量	12	
5	渗水试验点的初始含水率室内测试	21	①防渗层下部地层 ②湖底原底泥层 ③陆面地层

6.2 评价区水文地质条件分析

基于对评价区岩性特征、含水层分布和地下水动态分析，揭示评价区水文地质条件，为不同情景下的地下水动态评价提供条件。

6.2.1 地层岩性

评价区地表分布有较薄的粉土和粘性土层，下部为砂及卵砾石地层，再下为第四纪沉积的粘性土、砂卵石互层。地层岩性分布特征见图 6－3。

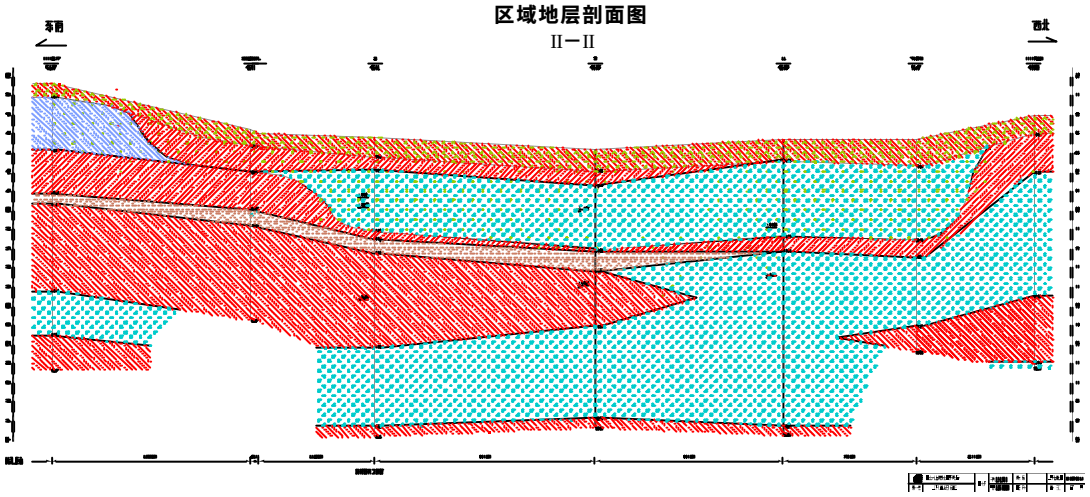


图 6－3 地层岩性分布特征

在 30m 的勘察深度上，由上向下地层分布特征为：

（1） 人工堆积层，分布于工程场地内表层，为粉质粘土、粘质粉土填土及房渣土，厚度一般在 0.70～2.40m；

（2） 新近沉积层，分布于人工堆积层之下。上部主要岩性为粉质粘土、重粉质粘土，砂质粉土、粘质粉土，粘土；下部为卵石、圆砾，细砂、中砂。平均厚度为 8.18m；

（3） 第四纪沉积层，分布于新近沉积层之下。按照自上而下地层分布，其岩性为：① 粉质粘土、重粉质粘土、细砂、中砂及粘质粉土、粉质粘土；② 粉质粘土、重粉质粘土、粘质粉土、砂质粉土、粘土及细砂；③ 卵石、圆砾、细砂、中砂；④ 粉质粘土、重粉质粘土层、粘土、重粉质粘土、粘质粉土、砂质粉土、细砂层。

6.2.2 含水层分布

根据北京市勘察设计研究院《北京市区浅层地下水水位动态规律研究》，圆明园位于清河古河道上。

根据岩性和含水性分布，分为潜水含水层和承压水含水层。两含水层之间的弱透水层中分布有透镜状含水层，其岩性、厚度变化较大，岩性主要以砂类土和粉土为主。

本次评价的目的层为古河道潜水含水层，底板埋深约为 10m。含水层岩性为新近沉积的砂、卵砾石，两侧边界为粉质粘土、粘土。含水层的厚度一般为 5~7m。由于近年来气候干旱和建筑排水，造成潜水水位明显下降，含水层厚度降低。

评价区的第一承压含水层位于潜水含水层之下，当地下水水位标高低于含水层顶板标高时，该层水呈无压状态。岩性主要以第四纪沉积的砂、卵砾石为主，含水层的厚度一般为 5~6m。

6.2.3 工程区湖泊渗透性能评价

圆明园区不同湖泊底部沉积物和地层的渗透能力直接影响湖泊水体与地下水之间的联系程度。鉴于目前防渗工程已将湖泊底部大部分原底泥层清理和扰动，难以恢复和评价原始状态下湖泊底泥层的渗透能力。基于此，本次防渗工程地下水环境影响评价的湖泊底部渗透性能测定，主要是通过现场渗水试验，测定湖岸土壤和防渗层下部地层的渗透性能。另外，为了恢复原始底泥渗透性能，通过对园区内未受防渗工程扰动区湖泊底泥防渗性能的现场测定，间接代表扰动底泥的渗透能力。渗水试验点性质与试验结果汇总见表 6－2。

渗水试验结果表明：

（1） 不同园区湖泊防渗层下部地层的渗透性具有较大差异。绮春园湖泊之下大部分有粘性土地层分布，厚度 1.5～2.0m；总体上粘性土层的渗透性较低，渗透系数为 10^{-5}cm/s。其中 S8 为膜下较深地层（粉质粘土层）的渗透性试验点，渗透系数为 1.1×10^{-3} cm/s；福海和长春园区中砂、砂砾石地层渗透性较好，渗透系数为 10^{-1}~10^{-3}cm/s。

（2） 圆明园区湖泊原状底泥的渗透性能较低，渗透系数可达 10^{-6}cm/s。由于原状底泥层分布状况已无法复原，具体分布情况较难确定。从防渗膜上覆层的岩性和分布分析，绮春园入水口附近底泥厚度不大，一般 0.2－0.4m；绮春园其它湖泊的膜上覆土多为粘性土，含砂较少，说明有一定厚度的底泥沉积；福海的部分地区也有一定厚度的底泥沉积，西北角处未扰动底泥的沉积厚度为 0.3－0.5m。从膜上覆土看，福海有约 1 半的区域覆土为粘性土，但掺杂砂砾石；余下部分以砂质土为主，含有粘土。长春园区湖泊的膜上覆土以砂质土或砂砾石为主，部分区域为含砂粘性土，分析其原底泥厚度不大。

表 6－2 渗水试验点信息汇总表

分区	点位	位置	岩性	渗透系数 (cm/s)
福海	S2	膜下地层	上中砂，下粗砂砾石	4.7×10^{-3}
	S3	膜下地层	粗砂－砾石	9.7×10^{-3}
	S4	膜下地层	粗砂砾石，砾石为主	3.0×10^{-2}
	S12	膜下地层	中砂层	2.2×10^{-2}
	芦苇北	原状底泥	粘土	3.1×10^{-5}
	芦苇南	原状底泥	粘土	2.0×10^{-5}
长春园	S5	膜下地层	砂卵砾石层	1.3×10^{-1}
	S7	膜下地层	中砂层	8.5×10^{-3}
绮春园	S8	膜下地层（深层）	粉质粘土	1.1×10^{-3}
	S9	膜下地层	粘土	1.9×10^{-5}
	S10	膜下地层	粘土	1.8×10^{-5}
	S11	膜下地层	粘土	2.1×10^{-5}
	N2	原底泥	粘土，有压实	1.7×10^{-6}
	N3	原底泥（小南园）	粘土，含砂	8.9×10^{-4}
湖岸	Y1	湖岸土壤	表层土	5.7×10^{-3}
	Y2	湖岸土壤	表层土	2.1×10^{-2}

6.2.4 地下水补、排特征

1. 潜水含水层

潜水含水层沿清河古河道呈条带状分布，地下水由西偏南向东偏北方向流动。受古河道沉积层下部及两侧粘性土层（下部厚度约 0.7~10m，两侧厚度约 1~6m）的约束，该层地下水与古河道两侧及下层地下水的水力交换相对较弱。

潜水主要补给来源为大气降水入渗和地表水渗漏等补给。潜水的天然动态类型为渗入－迳流型，其水位动态一般为 6~9 月份水位较高，其它月份水位较低，与大气降水的季节性规律一致，其水位年变幅一般为 1m～2m。典型潜水地下水位动态变化如图 6－4 所示。

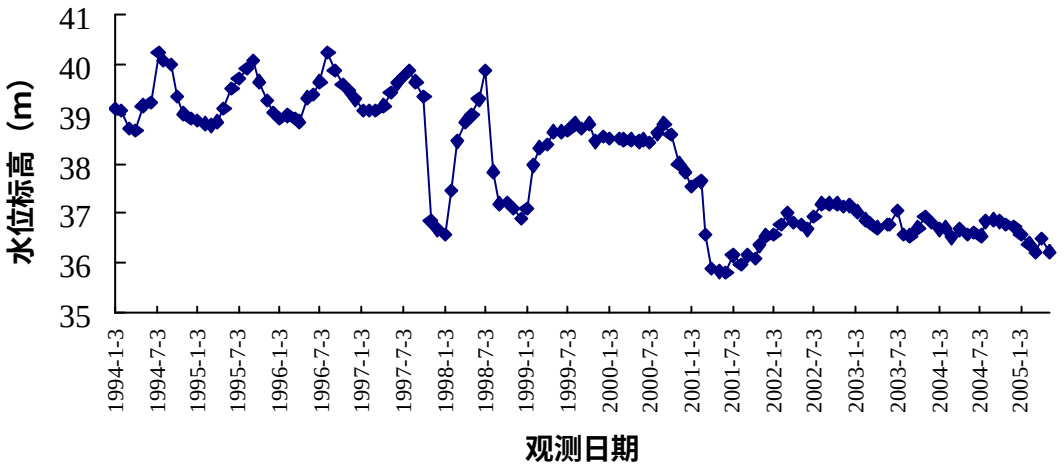


图 6－4 潜水水位年动态曲线

由图可见，评价区潜水地下水位动态受降雨控制明显，表现为 1999 年以来潜水水位持续下降，降幅达 3~4m。偏枯年份的连续出现是造成潜水地下水位持续下降的重要因素之一。此外，评价区上游边界由于受地面水体和地层岩性的影响，接受地面水体的补给。

评价区潜水的排泄途径主要包括分散或混合排水、施工排水、蒸发和越流排泄等。根据评价区地层岩性，潜水和下部承压水之间存在厚度为 2～10m，最大厚度可达 14m 的稳定的弱透水层，渗透系数为 0.23~2.92×10^{-6}cm/s，二者之间通过越流保持水力联系。据 2005 年地下水水位监测结果，潜水和第一承压含水层地下水位差一般在 5～7m，局部高达 10m，表现出二者之间较弱的越流水力联系。

值得关注的是近几年评价区内处于基础建设的高峰期，施工排水对局部地下水动态和流场分布影响明显。但由于施工排水具有随机性，难以有效监测排

水量和地下水位动态。

2. 承压水含水层

承压水天然动态类型属渗入－迳流型。主要补给形式为径流、越流补给，开采和侧向径流排泄。承压水头 11 月～来年 3 月份较高，其它月份相对较低，见图 6－5。



图 6－5 承压水水位年动态曲线

评价区承压水水位动态受降雨量和开采的双重影响，表现为 1999 年以来，随着年降雨量的明显降低和偏枯年份的连续出现，以及近几年地下水开采量的持续增加，造成承压水位持续下降，从 1998 年的 34m 持续下降至 2005 年的 24m，降幅达 10m。

6.2.5 地下水流场分析

地下水流场分布受古河道地形、地层岩性和边界条件的控制与影响，表现为地下水流受地形的控制由西向东，水力梯度为 1.0‰~1.5‰。潜水地下水流场分布见图 6－6 所示。

古河道受南、北阶地边界控制，地下水流向与古河道空间分布和地形具有一致性，地下水流动方向与区域地下水流动方向基本一致。由于古河道两侧弱透水层的广泛分布，使古河道地下水动态与区域地下水之间直接水力联系不密切。古河道潜水地下水位与承压水位差 5~7m，表现为越流水力联系。

评价区内地下水受人为干扰影响明显，尤其是对于潜水动态。施工排水对于局部潜水流场的影响明显，局部改变了地下水的流态，使地下水流场分布复杂化。施工排水加之圆明园湖泊干涸条件下的潜水流场分布见图 6－7。

由于圆明园 2005 年处于防渗工程施工期，园区地面水体很小，湖水对地下水的补给微弱。另外由于叠加施工排水影响，评价区地下水位与 2003 年水位相比下降明显，园区水位降幅 2.0~2.5m，局部处于疏干状态。在颐和园东部、清华西北门和大石桥形成规模不等的降落漏斗，明显改变了地下水天然流动状态，并在圆明园区内形成明显的地下水分水岭。

由于受到古河道地形地貌、地层岩性分布的制约，园明园区与区域地下水之间主要通过弱透水层发生微弱水力联系。基于此，工程项目环境影响评价的范围限定在古河道范围内。

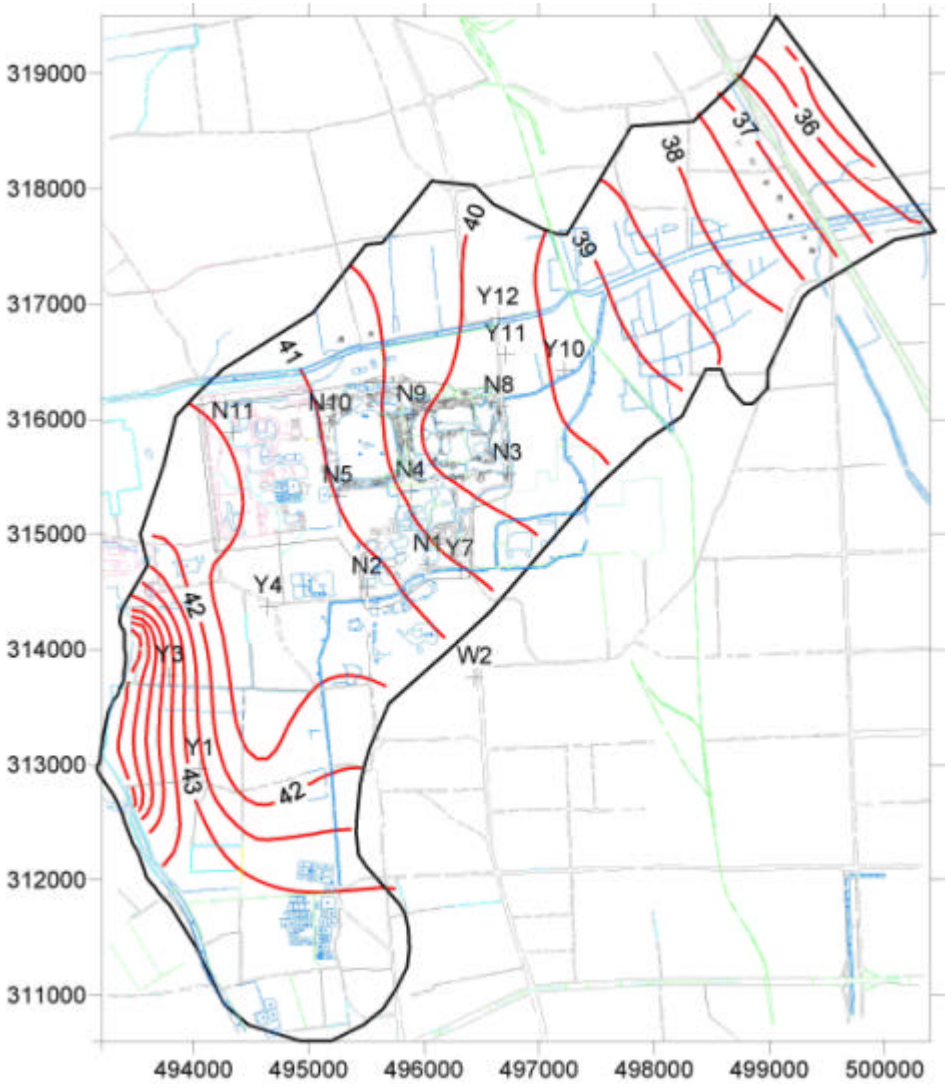


图 6－6 潜水流场分布（2003 年 7 月）

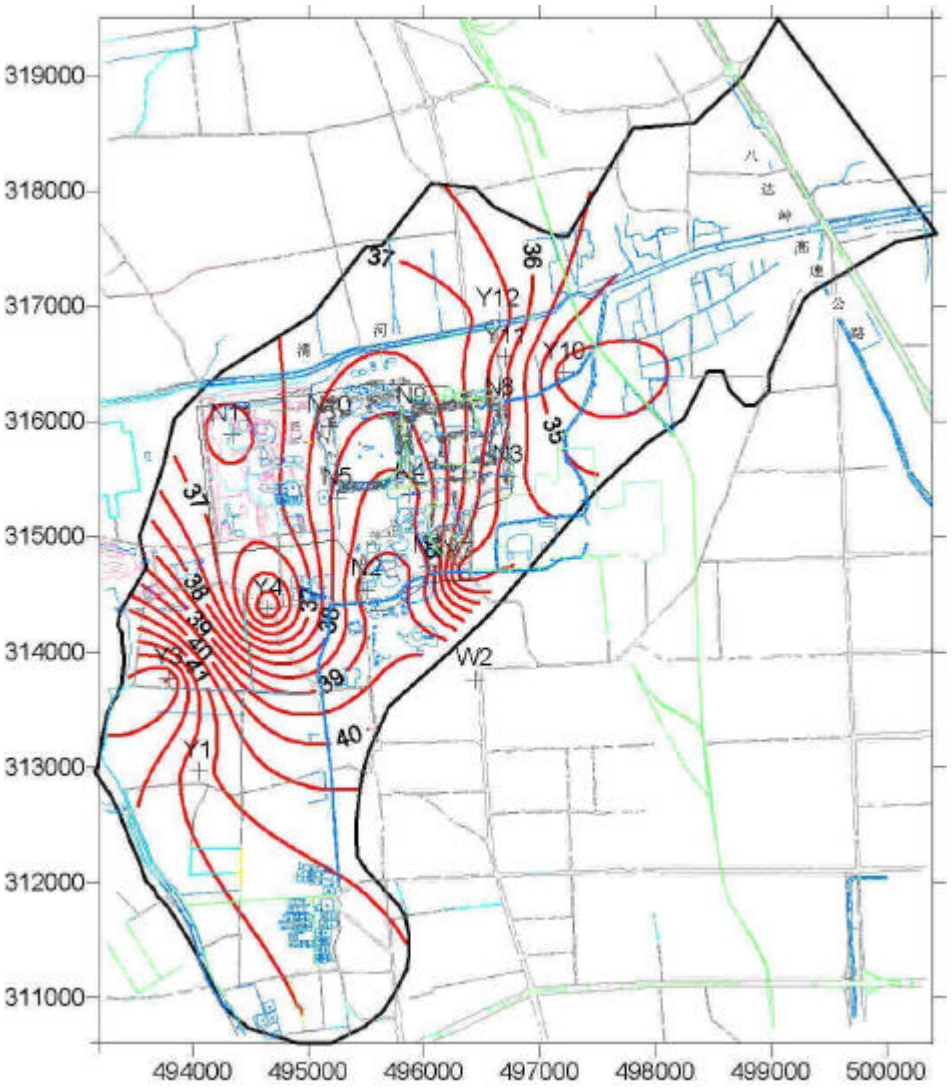


图 6－7 潜水流场分布（2005 年 5 月）

6.3 水文地质参数评价

6.3.1 包气带水文地质试验与参数评价

1. 包气带试验的目的、方法及试验布置

包气带水文地质试验的目的是通过试验获取包气带土层的渗透系数、土壤含水率、土壤水分特征曲线等参数，为模拟与预测包气带水分运动提供数据。

本次工作对圆明园包气带土层进行的渗透试验、土壤颗分等其它试验较多，可以据此确定土壤特性。含水率采用时域反射仪（TDR）测量，共测定含水率垂直剖面 19 处。

根据实际工作的需要及包气带水分模拟的要求，土壤水分特征曲线测定的取样方法如下：在试验点铲去表面松散土壤，在 20－30cm 深度采集原状环刀土样。取样时，先削切出一直径略大于环刀的土柱，将环刀刃口朝下放置于土柱上，然后将环刀压入土中，从环刀下部挖取土样，削平环刀两侧土壤，标记后用塑料袋封装。

在实验室，对取得的环刀土样充分饱和后，利用压力膜仪测定水分的特征曲线。在 0～1.5MPa 范围内测定样品在不同基质势下的体积含水率，并应用 Van Genuchten 经验公式拟合得到相应的不同岩性下的经验参数，得到土壤水分特征曲线。体积含水率的计算公式为

$$q = \frac{W_q - W_f}{rV} \qquad (6-1)$$

式中，q－某一基质势下的体积含水率(cm^3/cm^3)；W_q－该基质势下试样重量（g）；W_f－烘干后试样的重量（g）；r－ 样品中水的密度，取 $1g/cm^3$；V －试样体积，（cm^3）。

Van Genuchten 经验公式

$$q = q_r + (q_s - q_r)/\left[1 + (a|h - h_a|)^n\right]^m \quad (m=1-1/n，0<m<1) \quad (6-2)$$

式中，h－基质势（kPa）；ha－进气基质势，一般取 0～5kPa；$?s$、$?r$ 分别为样品的饱和与残余含水率，a、n 和 m 为待定参数。

布点原则：不同岩性、不同植被分布和地形地貌条件；满足包气带土壤水分运移计算的要求。

采样点深度：土壤含水率试验点的试验深度为 0～1.2m，土壤水分特征曲线采样点深度为 0.2～0.3m。

试验点分布：共布设了土壤含水率试验点 19 个，土壤水分特征曲线试验点 13 个（其中湖底大环刀试验点 4 个），试验点分布见图 6－8。

采集时间：2005 年 5 月 21 日。

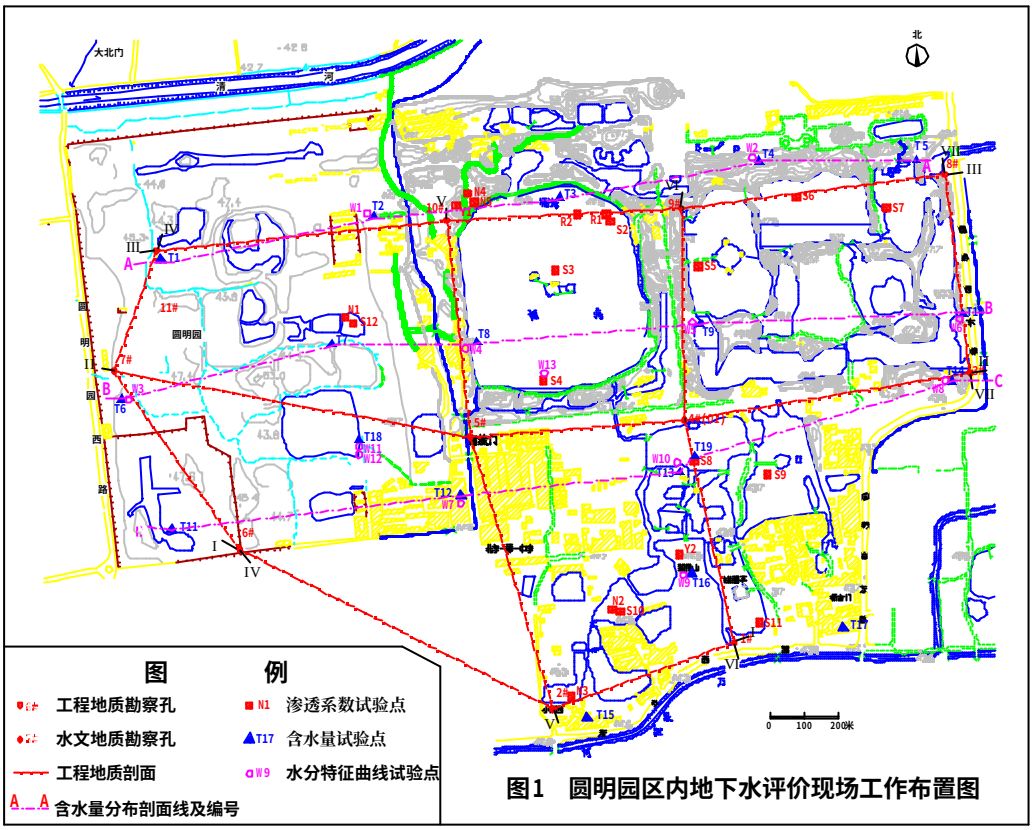


图1 圆明园区内地下水评价现场工作布置图

图 6－8 圆明园土壤含水率的测定点分布图

2. 包气带含水率试验结果与分析

1）含水率试验结果

不同深度土壤含水率的试验结果见表 6－3。

表 6－3 不同深度实测土壤体积含水率(v/v)

试验点编号	埋深 （cm）				
	15	30	60	90	120
T1	0.056	0.171	0.135	0.089	0.052
T2	0.199	0.282	0.123	0.077	0.063
T3	0.032	0.182	0.246	0.275	0.428
T4	0.091	0.100	0.086	0.081	0.197
T5	0.100	0.039	0.066	0.084	0.061
T6	0.155	0.250	0.133	0.110	0.101
T7	0.007	0.147	0.205	0.181	0.057
T8	0.035	0.118	0.087	0.068	0.074
T9	0.082	0.165	0.270	0.177	0.312

T10	0.097	0.056	0.074	0.095	0.194
T11	0.056	0.138	0.057	0.054	0.090
T12	0.024	0.083	0.118	0.276	0.248
T13	0.047	0.048	0.011	0.100	0.129
T14	0.091	0.182	0.214	0.188	0.364
T15	0.272	0.203	0.126	0.100	0.221
T16	0.070	0.077	0.132	0.105	0.224
T17	0.149	0.059	0.074	0.039	0.083
T18	0.114	0.177	0.124	0.046	0.053
T19	0.053	0.347	0.461	0.370	0.484

试验区土壤含水率随深度的分布曲线见图 6－9～6－12**，含水率在不同深度平面上的等值线如图** 6－13～6－17**。**

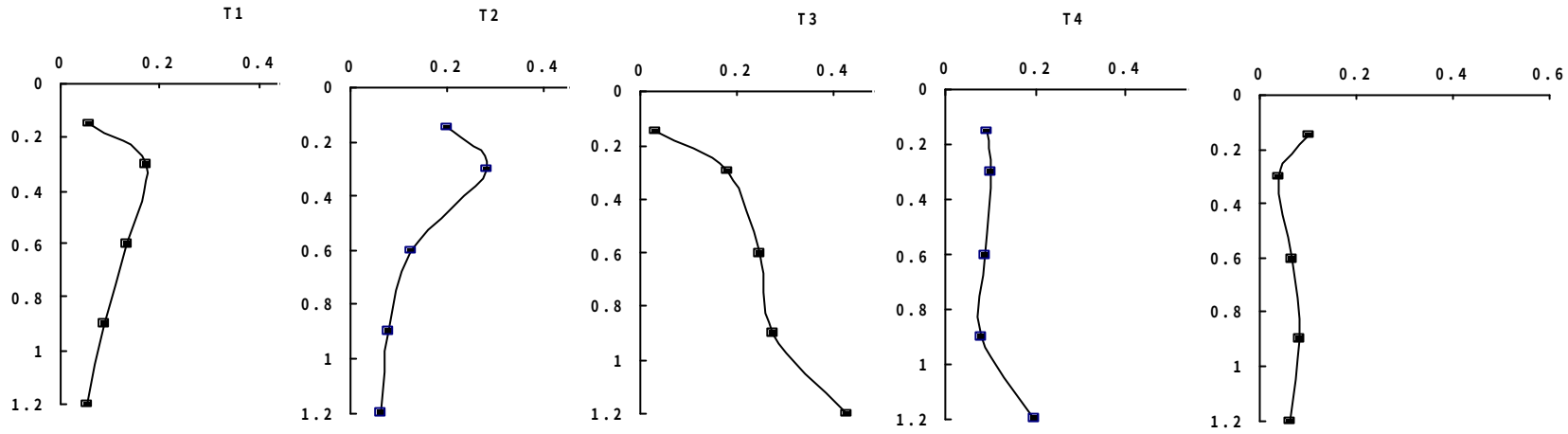


图 6－9 A-A 剖面各试验点含水率随深度变化曲线

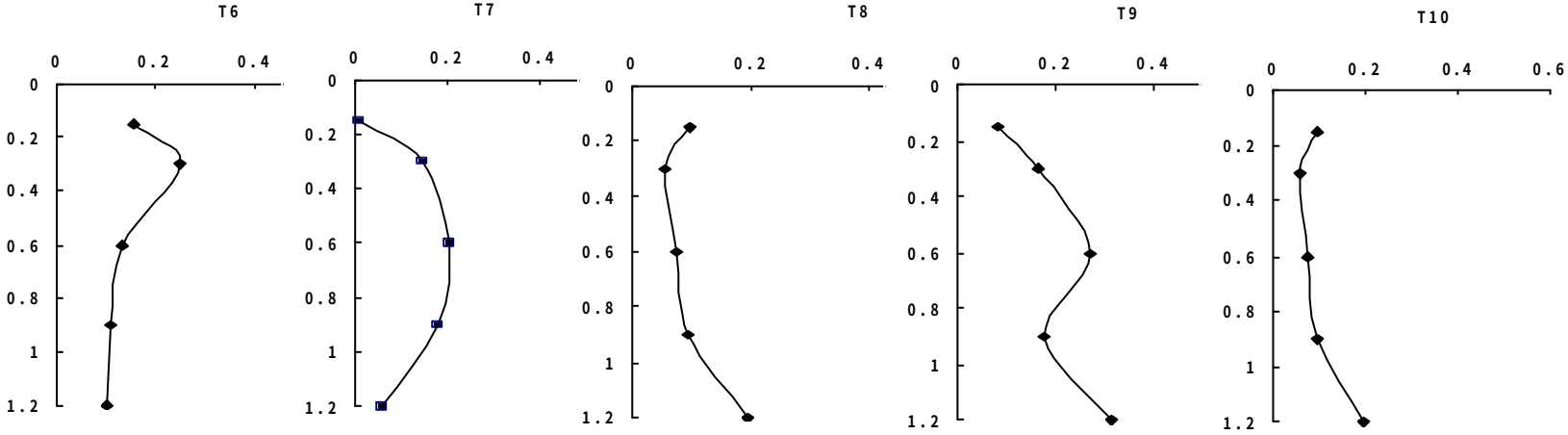


图 6－10 B-B 剖面各试验点含水率随深度变化曲线

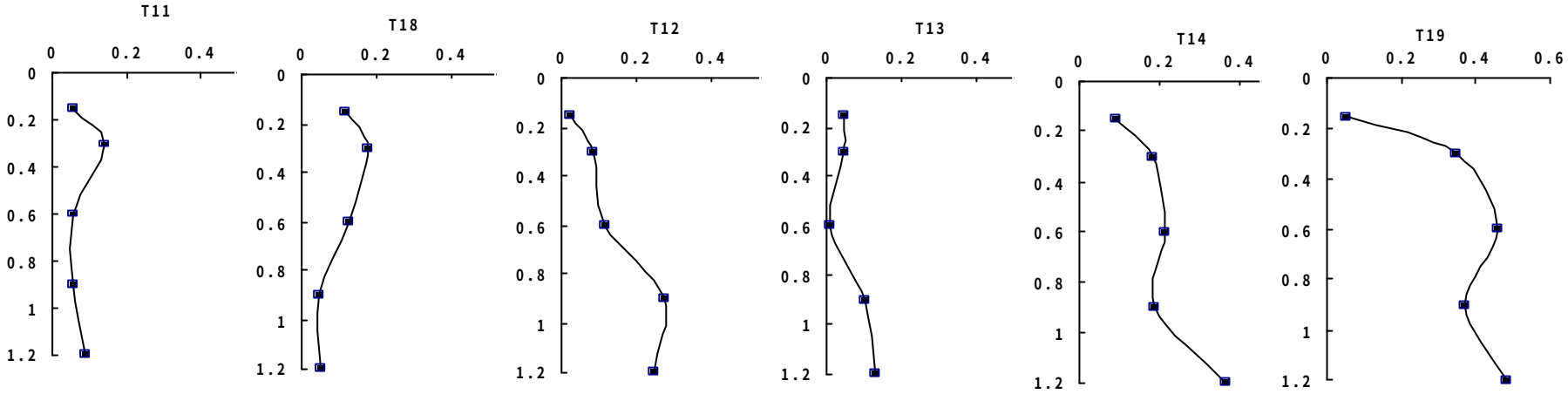


图 6－11 C-C 剖面各试验点含水率随深度变化曲线

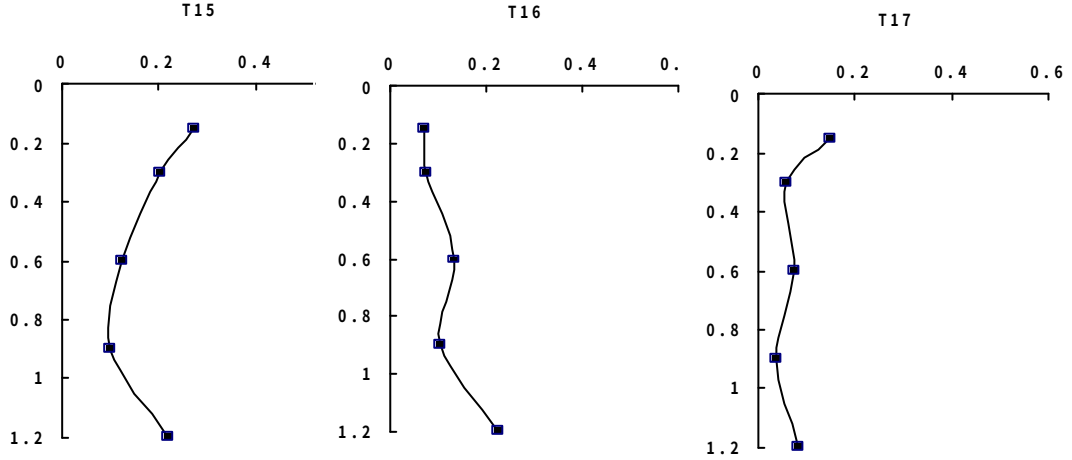


图 6－12 试验点 T15～T17 含水率随深度变化曲线

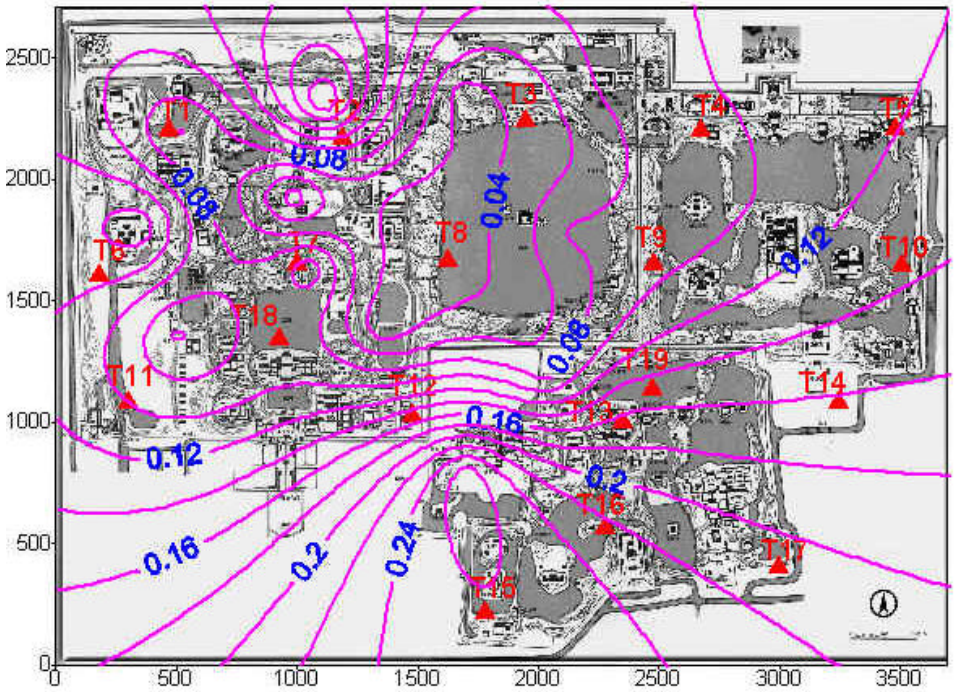


图 6－13　15cm 深度水平截面土壤含水率等值线图

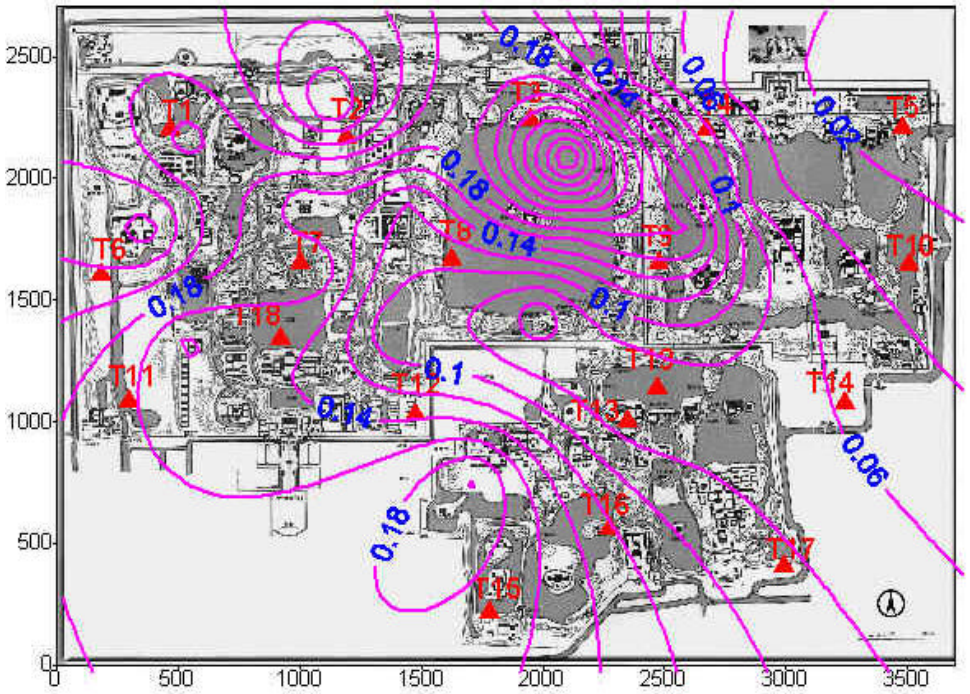


图 6－14　30cm 深度水平截面土壤含水率等值线图

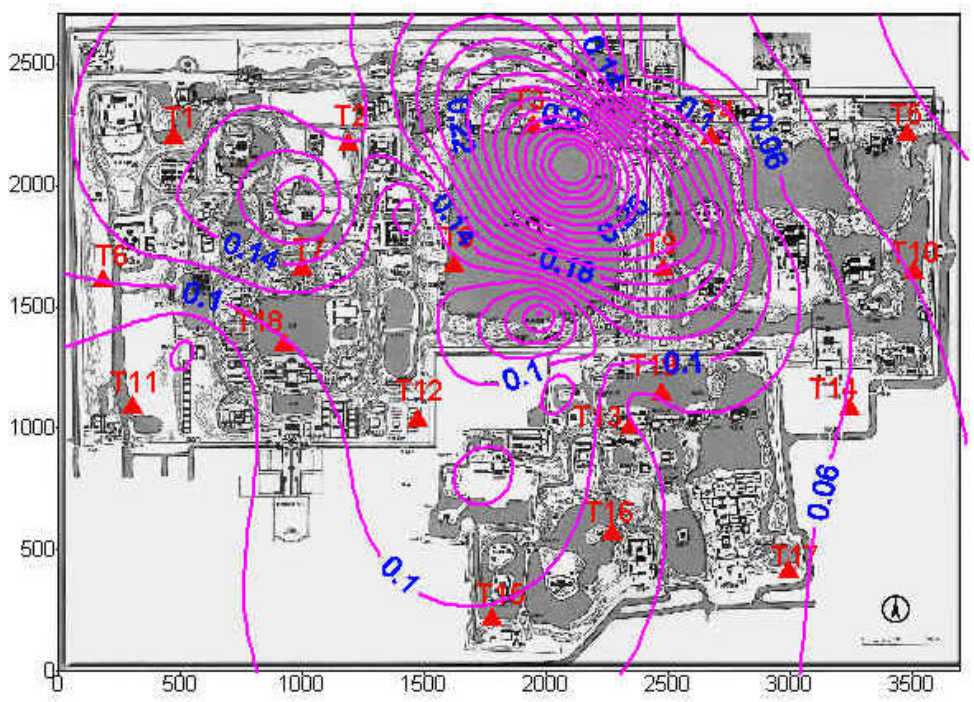


图 6－15　60cm 深度水平截面土壤含水率等值线图

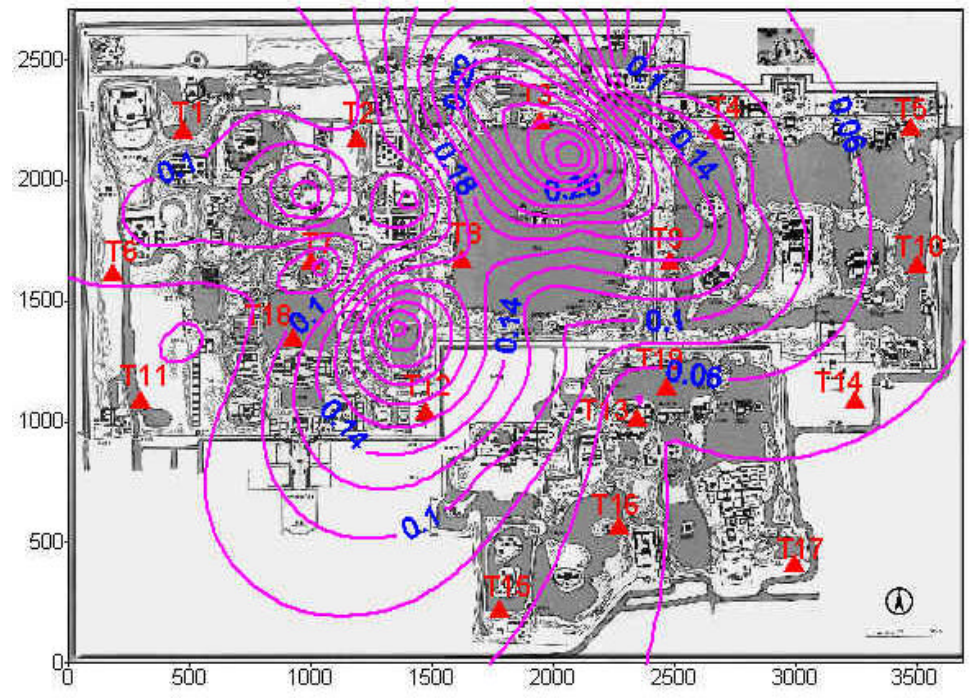


图 6－16　90cm 深度水平截面土壤含水率等值线图

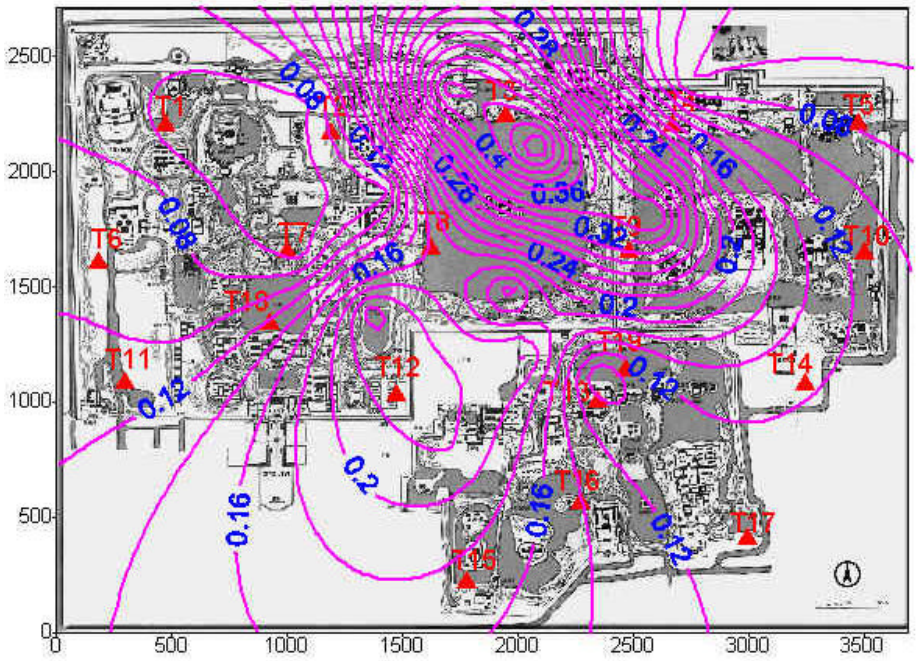


图 6－17　120cm 深度水平截面土壤含水率等值线图

试验结果显示：

（1） 对于表层 15cm 的含水率，绮春园为 0.18～0.24，普遍较其它区域高；福海和长春园的含水率在 0.08～0.10 之间，靠近北部的试验点的含水率只有 0.04～0.06；福海及周边地区的湖底裸露区含水率为 0.06～0.08，表现出极度干旱。

（2） 绮春园从 15cm 到 120cm 含水率逐渐减少，由 0.2 下降到 0.1 左右。

（3） 福海区含水率随深度增加而增大，由 0.06 逐渐增大到 0.30。

3. 土壤水分特征曲线试验结果

1）土壤水分特征曲线试验结果

本次试验在 19 个 TDR 试验点中选取 9 个（TDR 试验点编号：T2、T4、T 6、T 8、T 9、T 10、T 12、T 14、T 16）作为土壤水分特征曲线试验点，试验结果见表 6－4。

表 6－4　基质势与含水率关系试验结果

试验点编号	基质势（kPa）							
	0.5	10	50	130	300	625	920	1200
W1	0.414	0.354	0.238	0.208	0.197	0.191	0.186	0.181
W2	0.411	0.353	0.222	0.175	0.166	0.160	0.153	0.145
W3	0.361	0.326	0.284	0.234	0.208	0.197	0.186	0.178
W4	0.507	0.434	0.280	0.204	0.175	0.166	0.156	0.149
W5	0.292	0.274	0.237	0.192	0.177	0.167	0.161	0.155
W6	0.432	0.381	0.244	0.196	0.178	0.172	0.166	0.161
W7	0.387	0.349	0.267	0.236	0.201	0.187	0.175	0.169
W8	0.405	0.367	0.264	0.205	0.199	0.171	0.162	0.155
W9	0.402	0.363	0.285	0.210	0.174	0.160	0.150	0.142

2）土壤水分特征曲线拟合结果

根据 Van Genuchten 公式（式 6－1），通过拟合，得到土壤水分特征曲线参数见表 6－5，用于包气带水分运动模拟预测。

表 6－5 水分特征曲线参数

编号	岩性	饱和含水率	残余含水率	*a*	*n*
W1	粉质粘土	0.4200	0.1210	0.0426	1.2808
W2	粉质粘土	0.4100	0.1000	0.0258	1.3562
W3	粘质粉土	0.3600	0.1000	0.0114	1.2379
W4	粉质粘土	0.4955	0.1210	0.0146	1.4870
W5	粘质粉土填土	0.2900	0.1210	0.0012	1.5643
W6	粘质粉土填土	0.4300	0.1210	0.0195	1.4049
W7	砂质粉土	0.3900	0.1000	0.0187	1.2568
W8	粉质粘土	0.4100	0.0800	0.0141	1.2974
W9	粘质粉土填土	0.3720	0.0500	0.0057	1.3092
W10	砂质粉土	0.4100	0.0510	0.0025	1.8693
W11	细砂	0.2500	0.1000	0.0326	1.1175
W12	细砂	0.2500	0.1000	0.0129	1.1317

4. 其它参数的获取

在包气带水分及污染物运移的模拟预测中，需要输入的主要参数包括：土壤水分特征曲线、体积含水率、饱和渗透系数、孔隙度等，见表 6－6。

表 6－6 不同岩性的部分物理参数

岩性分层编号	岩性	重量含水率	容重 (g/cm^3)	饱和度	总孔隙度
①	粉质粘土填土	0.143	1.97	0.67	0.368
②	粉质粘土-重粉质粘土	0.204	1.93	0.81	0.404
$②_1$	粉质粘土	0.248	1.97	0.94	0.416
$②_2$	粘土	0.266	1.54	0.6	0.539
④	粉质粘土-重粉质粘土	0.203	2.05	0.92	0.376
$④_2$	粘质粉土-砂质粉土	0.163	2.12	0.93	0.319
⑤	粉质粘土-重粉质粘土	0.237	2.00	0.94	0.408
$⑤_1$	粘质粉土-砂质粉土	0.196	2.06	0.93	0.363
$⑤_2$	粘土	0.336	1.88	0.97	0.487
⑦	粘土-重粉质粘土	0.258	1.96	0.94	0.428
$⑦_1$	粉质粘土-重粉质粘土	0.341	1.86	0.95	0.498
$⑦_2$	粘土-重粉质粘土	0.199	2.10	0.99	0.352
平均值		0.23	1.95	0.88	0.413

6.3.2 含水层水文地质参数评价

1. 潜水含水层水文地质参数评价

1）试验区段水文地质条件

潜水含水层以砂砾石为主，岩性基本一致。运用抽水试验结果计算含水层参数的概化模型如图 6－18 所示。

潜水抽水试验的抽水主孔孔深 7.70m，穿透含水层至隔水底板，为一完整潜水井，井管为直径 127mm 的钢管，过滤管长 2.58m。两个观测孔深度分别为 7.70m 和 7.30m，观测孔的管径为 70mm，过滤管长度分别为 1.96m 和 2.00m。

2）试验资料

抽水试验历时 75h，连续抽水 51h，水位恢复 24h。抽水过程中平均稳定流量、抽水前的静止水位和抽水后期的相对稳定降深数据见表 6－7。

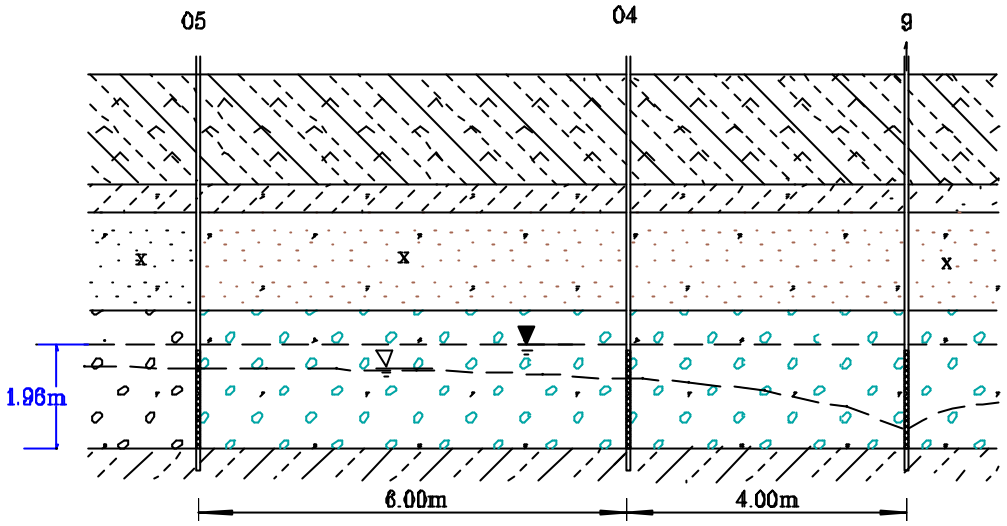


图 6－18 潜水抽水试验计算模型

表 6－7 潜水抽水试验资料统计表

孔号	主孔（9）	观测孔（O4）	观测孔（O5）	抽水量(m^3/d)
地面标高(m)	43.08	43.01	42.70	75.76
静止水位(m)	37.93	37.93	37.91	
水位降深(m)	1.766	0.360	0.225	

3）水文地质参数计算

利用直线法、水位恢复法和稳定流公式分别计算含水层渗透系数（K）、给水度（μ）和影响半径（R），结果见表 6－8 所示。具体求参过程参见本次《圆明园防渗工程水文地质勘查报告》。

表 6－8 潜水含水层参数汇总表

水文地质参数	渗透系数（m/d）	给水度	影响半径（m）
参数值	110	0.35	480

2. 承压含水层水文地质参数评价

1）试验区段水文地质条件概化

运用抽水试验结果求承压含水层参数的概化模型如图 6－19 所示。

抽水试验的抽水主孔孔深 32.00m，穿透承压含水层至隔水底板，井管为直径 254mm 的铸铁管，过滤管长 7.10m。三个观测孔深度分别为 29.50m，28.30m 和 7.10m，观测孔的观测管为直径 70mm 的镀锌铁管，过滤管长度分别为 2.97m、2.97m 和 1.97m。其中一个观测孔位于潜水含水层，用于判断承压水抽水过程中潜水是否对其产生越流影响。

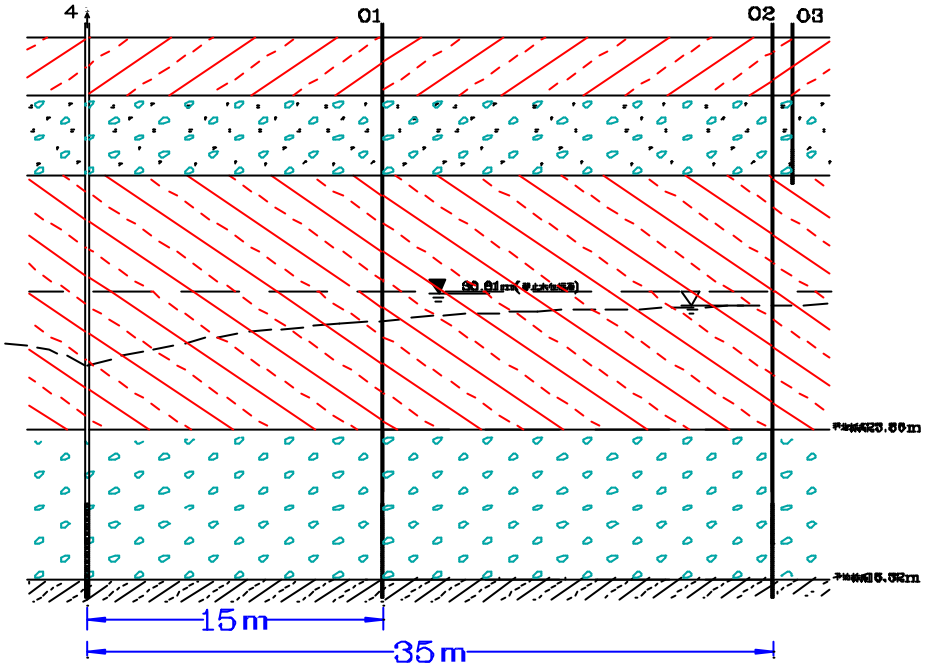


图 6－19 承压水抽水试验计算模型

2）试验资料

承压水抽水试验历时 54 小时，连续抽水 30h，水位恢复 24h。抽水过程中相对平均稳定流量为 644.25m^3/d，抽水前的静止水位和抽水结束时的相对稳定降深统计于表 6－9。

表 6－9 承压水抽水试验资料统计表

孔号	4	O1	O2	O3	抽水量(m^3/d)
地面标高(m)	43.68	43.68	43.49	43.46	644.25
静止水位(m)	30.828	30.813	30.796	38.696	
水位降深(m)	3.568	0.638	0.538	0.008	

承压水含水层中抽水时，对潜水水位影响很小，表明潜水对承压水的越流补给量有限。

3）水文地质参数计算

依据抽水试验结果，利用非稳定流直线法、配线法和稳定流公式计算承压含水层渗透系数（K）、导水系数（T）、弹性释水系数（μ^*）和影响半径（R），各参数的计算结果见表 6－10。具体求参过程参见本次《圆明园防渗工程水文地质勘查报告》。

表 6－10 承压含水层水文地质参数

参数项	K（m/d）	T（m^2/d）	μ^*	R
参数值	118	746	1.11×10^{-4}	3340

利用本次防渗工程区水文地质勘察所获得的水文地质参数，评价地下水影响评价不同情景下的地下水流场分布与变化。

6.4 地下水环境质量现状监测与评价

6.4.1 地下水环境质量监测

1. 监测点布置

根据现场水文地质勘察成果，结合圆明园所处地理位置和该地区地下水的基本运动规律，水质监测方案设计为：以圆明园区为主、兼顾上下游，以潜水为主、兼顾下层承压水和中间弱透水层；重点评价圆明园下部的浅层地下水质量状况。

将整个评价区分为 3 区 3 层：3 区分别为圆明园区、园外古河道沉积区和古河道沉积区外。3 层按照地下水埋藏条件由上至下分为潜水、（第一）承压水和深层承压水。设计现场取样分析 1 次，并收集 2001 年万泉河治理地下水水质分析资料和 2004 年清华大学地下水水质分析报告进行对照性分析。本次环评共布置现场地下水采样点 14 处，采样及资料收集工作布置见表 6－11 和图 6－20。

表 6－11 地下水质量监测点一览表

编号	地　点	水位（m）	区域位置	取样层位	取样日期
N1	圆明园内 1#井	38.68	园内	潜水	2005.5.23
N3	圆明园内 3#井	35.72	园内	潜水	2005.5.23
N4	圆明园内 4#井	38.76	园内	隔水层	2005.5.23

N6	圆明园内 6#井	—	园内	隔水层	2005.5.23
N8	圆明园内 8#井	36.30	园内	潜水	2005.5.23
N11	圆明园内 11#井	36.20	园内	潜水	2005.5.23
N12	圆明园内 O1 井	28.76	园内	承压水	2005.5.25
N14	圆明园内 O3 井	38.76	园内	潜水	2005.5.25
N16	圆明园内 O5 井	37.99	园内	潜水	2005.5.25
Y1	六郎庄	41.12	园外区内	潜水（上游）	2005.5.25
Y11	商业学校	36.14	园外区内	潜水（下游）	2005.5.25
W1	西北旺	45.07	区外	潜水	2005.5.25
W2	北大 C3	40.41	区外	潜水	2005.5.25
W3	中央党校(北)	33.07	区外	承压水	2005.5.25
W6	前八家（浅）	36.91	区内	潜水	2001.6.20
W7	前八家（深）	27.81	区内	承压水	2001.6.20
S1	清华 16 号楼	20.70	区内	深层承压水	2004.9.27
S2	清华 8 公寓	25.40	区外	深层承压水	2004.9.27

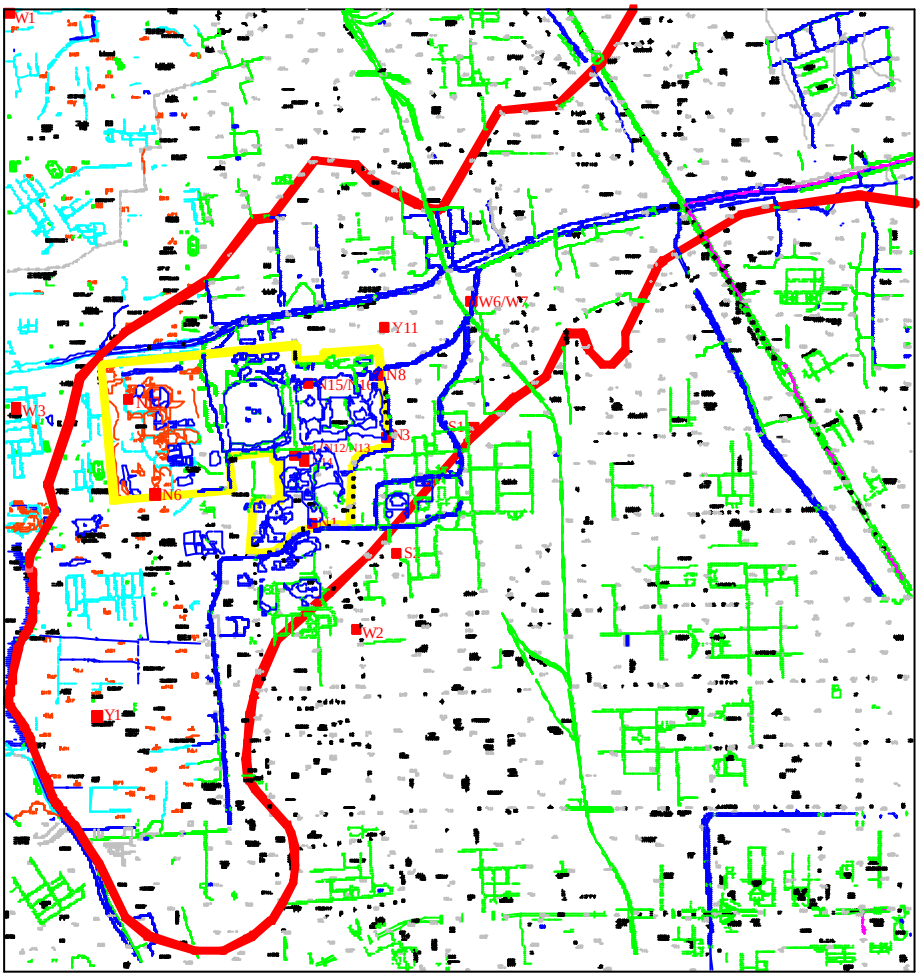


图 6－20　　地下水质量监测点分布图

2. 监测项目和方法

监测项目为色度、嗅和味、浑浊度、肉眼可见物、pH、总硬度、溶解性固体总量、高锰酸盐指数、硫酸盐、氯化物、氟化物、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、挥发酚、Cr^{+6}、Hg、Fe、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb、细菌总数、总大肠菌等 26 项指标。

现场采样分析委托“国家环境分析测试中心”完成。监测结果见表 6－12。

表 6－12　地下水水质监测结果　单位：mg/L

测试项目	N1	N3	N4	N6	N8	N11	检出限
pH （无量纲）	7.70	7.44	7.76	7.59	7.74	7.63	
总硬度	573	703	280	729	305	570	
溶解性固体总量	669	996	331	1090	349	1020	
高锰酸盐指数	5.04	3.76	2.16	1.20	1.84	1.36	

硫酸盐	283	509	41.7	462	55.3	560	
氯化物	56.1	43.4	47.9	64.4	41.3	42.9	
氟化物	0.52	0.36	0.56	0.28	0.47	0.25	
硝酸盐	1.5	1.4	1.4	16.7	1.3	1.3	
亚硝酸盐氮	0.0240	0.0209	0.0182	0.0529	0.0231	0.0443	
氨氮	3.48	0.828	0.0916	0.293	0.395	0.454	
六价铬	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.004
汞（μg/L）	0.338	N.D	0.258	N.D	0.298	0.219	0.199
铁	0.355	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04
锰	0.0861	0.340	0.00717	0.0480	N.D	0.0588	0.001
铜	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.005
锌	0.0773	0.0816	0.0406	0.0522	0.0283	0.0118	0.007
砷	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	10
镉	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.5
铅	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	5

续表 6－12

测试项目	N12	N14	N16	Y1	Y11	W1	W2	W3	检出限
色度	0	0	15	35	30	15	10	10	
嗅和味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	无任何气味	
浑浊度	19.1	34.1	42.5	32.1	32.6	202	85.4	39.7	
肉眼可见物	少量泥沙	有泥沙	有黄色泥沙	有黄色泥沙	有泥沙	浑浊有泥沙	有泥沙	有少量泥沙	
pH	7.57	7.58	7.50	7.63	7.32	7.46	7.71	8.15	
总硬度	369	408	433	478	618	350	307	225	
溶解性固体总量	536	627	591	706	944	496	474	449	
高锰酸盐指数	1.60	5.16	1.84	3.36	2.84	4.60	1.04	5.12	
硫酸盐	70.0	113	83.2	170	95.8	93.8	90.8	23.6	
氯化物	42.5	48.0	41.8	41.6	109	42.5	28.8	76.4	
氟化物	0.34	0.51	0.74	0.28	0.35	0.27	0.48	0.62	
硝酸盐	1.7	1.3	1.3	1.3	1.3	3.8	3.6	1.3	
亚硝酸盐氮	0.346	0.0881	0.00852	0.148	0.128	0.592	0.644	0.0244	
氨氮	0.895	2.58	1.41	1.78	1.92	0.536	0.296	10.7	

挥发酚	0.0174	0.0109	0.00460	0.00554	0.00595	0.0320	0.00479	0.0135	
六价铬	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.004
汞(μg/L)	0.298	N.D	N.D	N.D	0.973	0.735	0.219	0.933	0.199
铁	N.D	0.160	0.077	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.04
锰	0.174	0.182	0.172	0.0723	0.438	0.0639	0.0847	0.0397	0.001
铜	N.D	0.00921	N.D	N.D	0.0125	0.00719	N.D	N.D	0.005
锌	1.81	0.685	0.566	0.0151	0.110	0.257	1.39	0.598	0.007
砷	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	10
镉	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.5
铅	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	5
细菌总数	130	>100	36	>100	>100	>100	95	>100	
总大肠菌	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	

6.4.2 地下水环境质量现状评价

1. 评价方法和指标

本次评价采用综合评价法，评价指标包括：pH、总硬度、溶解性固体总量、高锰酸盐指数、硫酸盐、氯化物、氟化物、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、挥发酚、Cr^{+6}、Hg、Fe、Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等 20 项指标，细菌学指标单独评价并附于综合评价级别之后。

2. 评价步骤

（1）将各项指标首先进行单项组分评价。根据《地下水环境质量标准》将所列分类指标划分为 5 类，对照单项组分测试结果与标准值，确定所属质量类别。

（2）确定各单项组分评分值 f_i。根据组分所属质量级别按照表 6－13 进行评分。

表 6－13　地下水评价单项组分评价分值表

类别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
f_i	0	1	3	6	10

（3）按下列公式计算综合评价分值 F

$$F=\sqrt{\frac{f^2+f_{\max}^2}{2}} \qquad (6-3)$$

$$f=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}f_i \qquad (6-4)$$

（4）根据 F 值，按照规定划分地下水质量级别，见表 6－14，再将细菌学指标评价结果注在级别定名之后。

表 6－14　地下水质量综合评价级别分类表

级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	＜0.80	0.80～＜2.50	2.50～＜4.25	4.25～＜7.20	=7.20

（5）根据单项组分质量分类，选择重点污染指标进行定量分析。

3. 评价结果

依据上述评价方法，计算得到地下水环境质量评价结果见表 6－15～表 6－18。

由于 2001 年前八家水质分析报告中仅有溶解性总固体、总硬度、氨氮、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-等五项指标，不适合采用综合评价法，因此采用单项组分评法。同时由于其中包括了本次评价的主要因子（总硬度、氨氮、SO_4^{2-}、NO_3^-等），因此同样具有可比性。

表 6－15　圆明园区内潜水水质评价成果表

项目	N1		N3		N8		N11		N14		N16	
	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价
嗅和味	—	—	—	—	—	—	—	—	无	0	无	0
pH	7.70	0	7.44	0	7.74	0	7.63	0	7.58	0	7.50	0
总硬度	573	10	703	10	305	3	570	10	408	3	433	3
溶解性固体	669	3	996	3	349	1	1020	6	627	3	591	3
高锰酸盐指数	5.04	6	3.76	6	1.84	1	1.36	1	5.16	6	1.84	1
硫酸盐	283	6	509	10	55.3	1	560	10	113	1	83.2	1
氯化物	56.1	1	43.4	0	41.3	0	42.9	0	48.0	0	41.8	0
氟化物	0.52	0	0.36	0	0.47	0	0.25	0	0.51	0	0.74	0
硝酸盐	1.5	0	1.4	0	1.3	0	1.3	0	1.3	0	1.3	0
亚硝酸盐	0.024	6	0.021	6	0.023	6	0.044	6	0.088	6	0.009	1
氨氮	3.48	10	0.828	10	0.395	6	0.454	6	2.58	10	1.41	10
挥发酚	—	—	—	—	—	—	—	—	0.011	10	0.005	6
六价铬	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
汞	0.338	1	N.D	0	0.298	1	0.219	1	N.D	0	N.D	0
铁	0.355	6	N.D	0	N.D	0	N.D	0	0.160	0	0.077	0
锰	0.0861	3	0.340	6	N.D	0	0.0588	3	0.182	6	0.172	6
铜	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	0.009	0	N.D	0
锌	0.077	1	0.082	1	0.028	0	0.012	0	0.685	6	0.566	3
砷	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
镉	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
铅	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
细菌总数	—	—	—	—	—	—	—	—	>100	6	36	0
总大肠菌	—	—	—	—	—	—	—	—	>100	10	>100	10
f		2.79		2.74				2.26		2.43		1.62
F		7.34		7.33				7.25		7.28		7.16
级别定名		极差		极差				极差		极差（IV）		较差（I）

表 6－16　圆明园区外潜水水质评价成果表

项目	N4		N6		Y1		Y11		W1		W2	
	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价
嗅和味	—	—	—	—	无	0	无	0	无	0	无	0
pH	7.76	0	7.59	0	7.63	0	7.32	0	7.46	0	7.71	0
总硬度	280	1	729	10	478	6	618	10	350	3	307	3
溶解性固体	331	1	1090	6	706	3	944	3	496	1	474	1
高锰酸盐	2.16	3	1.20	1	3.36	6	2.84	3	4.60	6	1.04	1
硫酸盐	41.7	0	462	10	170	3	95.8	1	93.8	1	90.8	1
氯化物	47.9	0	64.4	1	41.6	0	109	1	42.5	0	28.8	0
氟化物	0.56	0	0.28	0	0.28	0	0.35	0	0.27	0	0.48	0
硝酸盐	1.4	0	16.7	3	1.3	0	1.3	0	3.8	1	3.6	1
亚硝酸盐	0.018	3	0.053	6	0.148	10	0.128	10	0.592	10	0.644	10
氨氮	0.092	3	0.293	6	1.78	10	1.92	10	0.536	10	0.296	6
挥发酚	—	—	—	—	0.005	6	0.006	6	0.032	10	0.005	6
六价铬	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
汞	0.258	1	N.D	0	N.D	0	0.973	3	0.735	3	0.219	1
铁	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
锰	0.007	0	0.048	0	0.072	3	0.438	6	0.064	3	0.085	3
铜	N.D	0	N.D	0	N.D	0	0.013	1	0.007	0	N.D	0
锌	0.041	0	0.052	1	0.015	0	0.110	1	0.257	1	1.39	6
砷	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
镉	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
铅	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0	N.D	0
细菌总数	—	—	—	—	>100	6	>100	6	>100	6	95	0
总大肠菌	—	—	—	—	>100	10	>100	10	>100	10	>100	10
f		0.63		2.32		2.24		2.62		2.33		1.86
F		7.08		7.26		7.25		7.31		7.26		7.19
级别定名		较差		极差		极差（IV）		极差（IV）		极差（IV）		较差（I）

表 6－17 地下水承压水和深层承压水水质评价成果表

项目	N12		W3		S1		S2	
	实测	评价	实测	评价	实测	评价	实测	评价
嗅和味	无	0	无	0	无	0	无	0
pH	7.57	0	8.15	0	7.24	0	7.36	0
总硬度	369	3	225	1	316	3	314	3
溶解性固体	536	3	449	1	399	1	358	1
高锰酸盐	1.60	1	5.12	6	—	—	—	—
硫酸盐	70.0	1	23.6	0	81.2	1	76.2	1
氯化物	42.5	0	76.4	1	26.1	0	23.8	0
氟化物	0.34	0	0.62	0	0.32	0	0.28	0
硝酸盐	1.7	0	1.3	0	1.76	0	2.24	1
亚硝酸盐	0.346	10	0.0244	6	0.001	0	<0.001	0
氨氮	0.895	10	10.7	10	<0.02	0	<0.02	0
挥发酚	0.0174	10	0.0135	10	<0.002	3	<0.002	3
六价铬	N.D	0	N.D	0	<0.004	0	<0.004	0
汞	0.298	1	0.933	3	<0.001	3	<0.001	3
铁	N.D	0	N.D	0	<0.01	0	<0.01	0
锰	0.174	6	0.0397	0	<0.01	0	<0.01	0
铜	N.D	0	N.D	0	<0.01	0	<0.01	0
锌	1.81	6	0.598	3	—	—	—	—
砷	N.D	0	N.D	0	<0.005	0	<0.005	0
镉	N.D	0	N.D	0	<0.005	3	<0.005	3
铅	N.D	0	N.D	0	<0.01	1	<0.01	1
氰化物	—	—	—	—	<0.002	1	<0.002	1
浑浊度	—	—	—	—	<1	0	<1	0
色度	—	—	—	—	<5	0	<5	0
细菌总数	130	6	>100	6	30	0	86	0
总大肠菌	>100	10	>100	10	无	0		0
f		2.428571		1.952381		0.695652		0.73913
F		7.276605		7.204575		2.177606		2.184756
级别定名		极差（IV）		极差（IV）		良好（I）		良好（I）

注：IV **等－水质类别；**N.D**－未监测**

表 6－18 地下水环境质量评价成果汇总表

		园内（平均）	园外区内		区外	历史(2001)
			上游	下游		
潜水	评价级别	极差（IV）	极差（IV）	极差（IV）	极差（IV）	
	主要污染因子(污染指数)	氨氮(10) 挥发酚(6) 亚硝酸盐（6） 总硬度（6）	氨氮(10) 亚硝酸盐（10） 挥发酚(6) 总硬度（6） 高锰酸盐指数(6)	氨氮(10) 亚硝酸盐（10） 总硬度（10） 挥发酚(6) 锰（6）	亚硝酸盐（10） 氨氮(10) 挥发酚(10)	氨氮(6) 溶解性总固体(6) 总硬度（6）
承压水	评价级别	极差（IV）			极差（IV）	
	主要污染因子	亚硝酸盐(10) 氨氮(10) 挥发酚(10) 锰（6） 锌（6）			氨氮(10) 挥发酚(10) 亚硝酸盐（6） 高锰酸盐指数（6）	氨氮(6) 溶解性总固体(3) 总硬度（3）
深层承压水		良好（I）		良好（I）		

注：表中（10）表示评价分值

4. 评价结果分析

（1） 区域内地下水在历史上水质较好，潜水和（第一）承压水达到地下水环境质量Ⅳ类标准。承压水的水质略优于潜水，除氨氮外，其余指标均可达到Ⅲ类标准。潜水的主要污染物为氨氮、总硬度和溶解性固体，承压水的主要污染物为氨氮。

（2） 潜水和承压水的水环境质量现状评价结果显示，潜水质量极差占66.7%，较差占33.3%。主要污染因子为氨氮、亚硝酸盐、挥发酚、高锰酸盐指数和总硬度等。区域深层承压水的水环境质量状况较好，良好占100%。

6.5 地下水环境影响预测评价

6.5.1 包气带地下水预测评价

1. 包气带水分运移模型

考虑介质压缩性的包气带水分运移模型为：

$$r(a'\frac{q}{n}+b'q+\frac{dq}{dH})\frac{\partial H}{\partial t}=\nabla[rK(S)\nabla\Phi]+q$$

式中，x，z 为空间坐标（L）；r 为水密度（M/L^3）；b' 为介质的可压缩性修正系数（1/T），$b'=brg$；$K(S)$ 为水力传导率（L/T），$K(S)=k(S)g/m$，m 为给水度；a' 为水的可压缩性修正系数（1/T），$a'=arg$；q 为含水率（L^3/L^3）；n 为有效孔隙度（无量纲）；H 为压力水头（L）；? 为总水头（L）；t 为时间（T）；S 为饱和度（无量纲）；q 为源汇项。

上式联合初始、边界条件构成包气带水分运移模型。

采用的包气带水分运移程序为 WATERM。WATERM 程序可以用来模拟均匀介质中的水流流场，也可以模拟非均匀介质中的流场。通过输入参数文件，进行计算，并将计算结果保存到目标文件中。

2. 包气带水量评价与预测

1）降雨入渗补给量

大气降水入渗是包气带水及潜水重要的补给来源，补给量大小与降水量、潜水位埋深以及包气带土层特性等因素有关。

大气降水入渗量计算公式为

$$Q_j=a\cdot F\cdot X \qquad (6-5)$$

式中，Q_j－降雨入渗补给量（10^4m^3/a）；a－年降水入渗系数；F—计算区面积（10^4m^2）；X—年降水量（m/a）。

2）潜水蒸发量

蒸发是埋藏较浅潜水的重要排泄途径。潜水蒸发量的大小主要与潜水位埋

深、包气带岩性、地表植被和气候因素有关。

潜水蒸发量由下式计算

$$Q_e = F \cdot e_0 \cdot (1-\Delta/\Delta_0)^n \qquad (6-6)$$

式中，Q_e－地下水蒸发排泄量（$10^4m^3/a$）；Δ－埋深小于 4m 的平均水位埋深（m）；Δ_0—地下水蒸发极限埋深 4m（m）；F—地下水位埋深小于 4m 的区域面积（10^4m^2）；e_0—液面蒸发强度 mm/a；n—与岩性有关的指数（粉土、粉质粘土取 1.5，粉砂取 1.0）。

3）其它参数

土壤水分特征曲线参数、体积含水率、渗透系数、孔隙度以实测值给定。

3. 包气带水分运动一维模拟预测

1）代表性剖面选取

选取 3 个垂直一维剖面进行包气带水分运动一维模拟计算。计算剖面的选择，考虑了地貌上的代表性、位置上的均匀性和覆膜情况等，参见图 6－8，其中 T2 为未覆膜的湖底剖面，T8 为已覆膜的湖底剖面，T14 为较平坦的陆地剖面。

2）预测情景的确定

包气带水分运动模型在经过模拟验证后，可以预测不同条件下包气带含水率和基质势的分布。预测情景的确定原则是从研究目标出发，考虑气象、水文以及水文地质等条件综合确定。根据圆明园所在区域气象、水文条件以及圆明园园区水文地质条件，将影响包气带土壤含水率及基质势分布状况的主要因素确定为：地下水位、大气降水量、蒸发量、湖水深度、是否覆膜。结合 T2（湖底）、T8（湖底）、T14（湖岸）三个一维剖面的具体情况，确定各剖面的预测情景见表 6－19、表 6－20、表 6－21。

情景划分为潜水水位高埋深和低埋深两种情景。潜水高埋深是基于 2005 年 5 月 T2、T8 和 T14 试验点处潜水实际埋深，分别为 5.24m、4.50m 和 5.81m。潜水高水位情景参照 2003 年 5 月的圆明园潜水位实际监测结果。每种情景考虑丰水期（雨季，7 月～9 月）、枯水期（12 月～来年 3 月）和年平均三种状况下的降水及蒸发条件，具体见表 6－22。

表 6－19　湖底剖面（T2 剖面）土壤水分预测情景

情景编号	地下水位埋深 m	湖水深度 m	淤泥层厚度 m	覆膜
T2-1	2.00	0	0.5	否
T2-2	2.00	0.8	0.5	否
T2-3	2.00	1.5	0.5	否
T2-4	2.00	/	0.5	是
T2-5	5.24	0	0.5	否
T2-6	5.24	0.8	0.5	否
T2-7	5.24	1.5	0.5	否
T2-8	5.24	/	0.5	是

表 6－20　湖底剖面（T8 剖面）土壤水分预测情景

情景编号	地下水位埋深 m	湖水深度 m	淤泥层厚度 m	覆膜
T8-1	2.85	无水	0	否
T8-2	2.85	0.8	0	否
T8-3	2.85	1.5	0	否
T8-4	2.85	/	0 或 0.5	是
T8-5	4.50	无水	0	否
T8-6	4.50	0.8	0	否
T8-7	4.50	1.5	0	否
T8-8	4.50	/	0 或 0.5	是
T8-9	2.85	无水	0.5	否
T8-10	2.85	0.8	0.5	否
T8-11	2.85	1.5	0.5	否
T8-12	4.50	无水	0.5	否
T8-13	4.50	0.8	0.5	否
T8-14	4.50	1.5	0.5	否

表 6－21　湖岸（T14）剖面的预测情景

情景编号	地下水位埋深 m
T14-1	2.00
T14-2	4.50
T14-3	5.81

表 6－22 湖底 T2 剖面降水入渗量及潜水蒸发量参数取值

水位埋深 m	计算期	降水入渗量 cm/d	潜水蒸发量 cm/d
2	丰水期	0.158	0.115
	枯水期	0.008	0.042
	年平均	0.056	0.102
5.24	丰水期	0.158	0
	枯水期	0.008	0
	年平均	0.056	0

3）预测结果及分析

湖底 T2 剖面模拟中的降水入渗量及潜水蒸发量参数根据 2004 年 1 月～2005 年 4 月实测气象资料由式（6－5）、式（6－6）计算。

湖底 T2 剖面在不同情景下的预测稳定含水率见图 6－21。不同情景下含水率随深度变化差异很大。在铺膜情况下（情景 T2－4 和 T2－8），水分由于没有降水入渗和蒸发等条件，而在总水头驱动下达到平衡状态。

湖底 T8 剖面模拟中的降雨入渗量及潜水蒸发量参数取值见表 6－23。不同情景下的预测稳定含水率分布见图 6－22。

表 6－23　湖底 T8 剖面降水入渗量及潜水蒸发量参数取值

水位埋深 m	计算期	降水入渗量 cm/d	潜水蒸发量 cm/d
2.85	丰水期	0.158(0.125)	0.093(0.083)
	枯水期	0.008(0.006)	0.034(0.030)
	年平均	0.056(0.044)	0.083(0.074)
4.5	丰水期	0.158(0.125)	0(0)
	枯水期	0.008(0.006)	0(0)
	年平均	0.056(0.044)	0(0)

注：括号内为湖底有 0.50m 淤泥时的值。

在没有淤泥且湖内有水情况下，稳定时的土壤含水率达到饱和（情景 T8－2、T8－3、T8－6、T8－7），而在有 0.5m 淤泥且湖内有水情况下，计算期（365 天）期末除淤泥外其它土壤含水率尚未达到饱和状态（情景 T8－10、T8－11、T8－13、T8－14）。

湖岸 T14 剖面模拟中的降水入渗量及潜水蒸发量参数根据 2004 年 1 月～2005 年 4 月实测气象资料由式（6－5）、式（6－6）计算，结果见表 6－24。湖岸 T14 剖面在不同情景下的预测稳定含水率结果见图 6－23。

表 6－24　湖岸 T14 剖面降水入渗量及潜水蒸发量参数取值

水位埋深 m	计算期	降水入渗量 cm/d	潜水蒸发量 cm/d
2	丰水期	0.075	0.115
	枯水期	0.004	0.042
	年平均	0.026	0.102
4.5 和 5.81	丰水期	0.075	0
	枯水期	0.004	0
	年平均	0.026	0

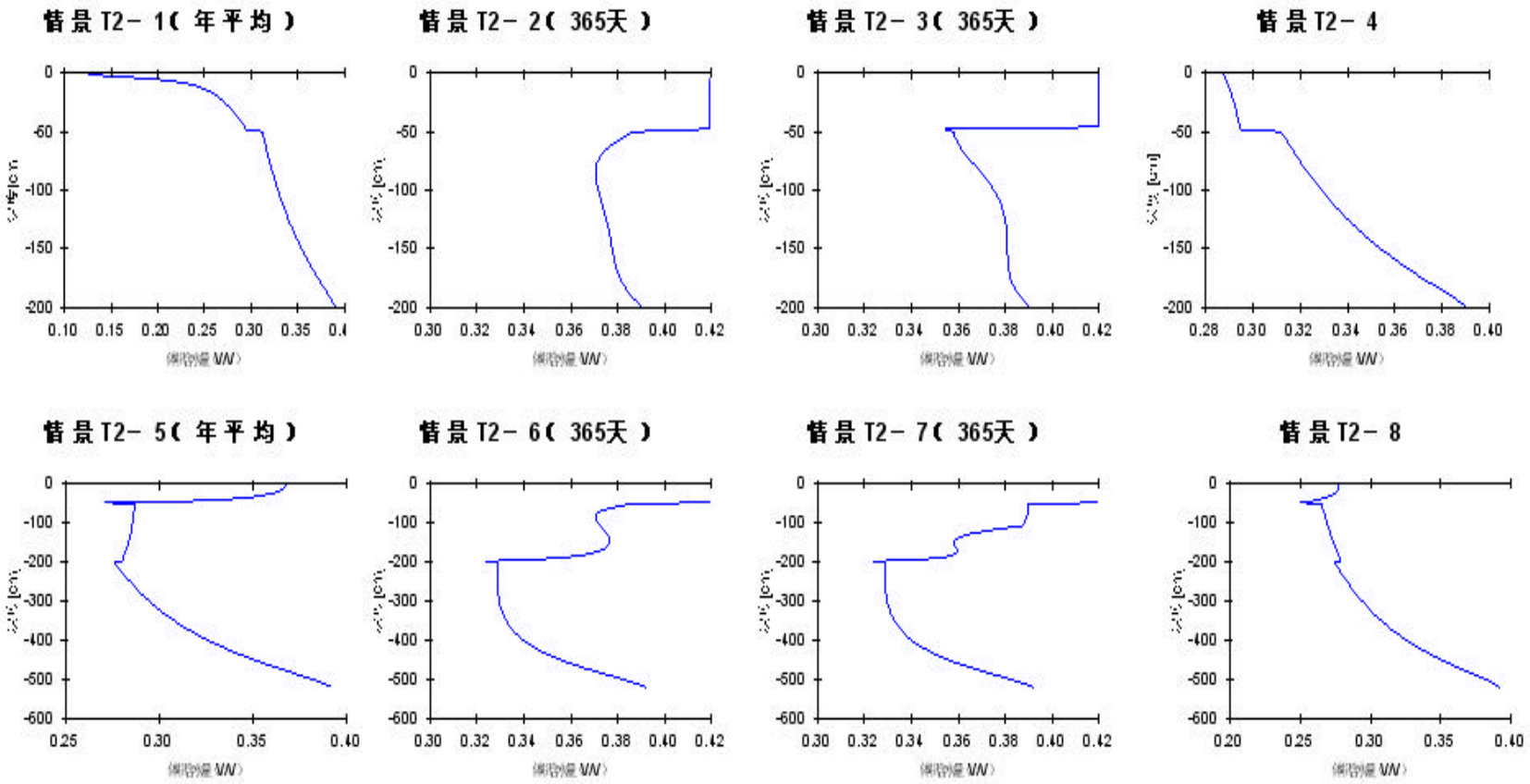


图 6－21 湖底 T2 剖面不同情景下的含水率随深度变化预测结果图

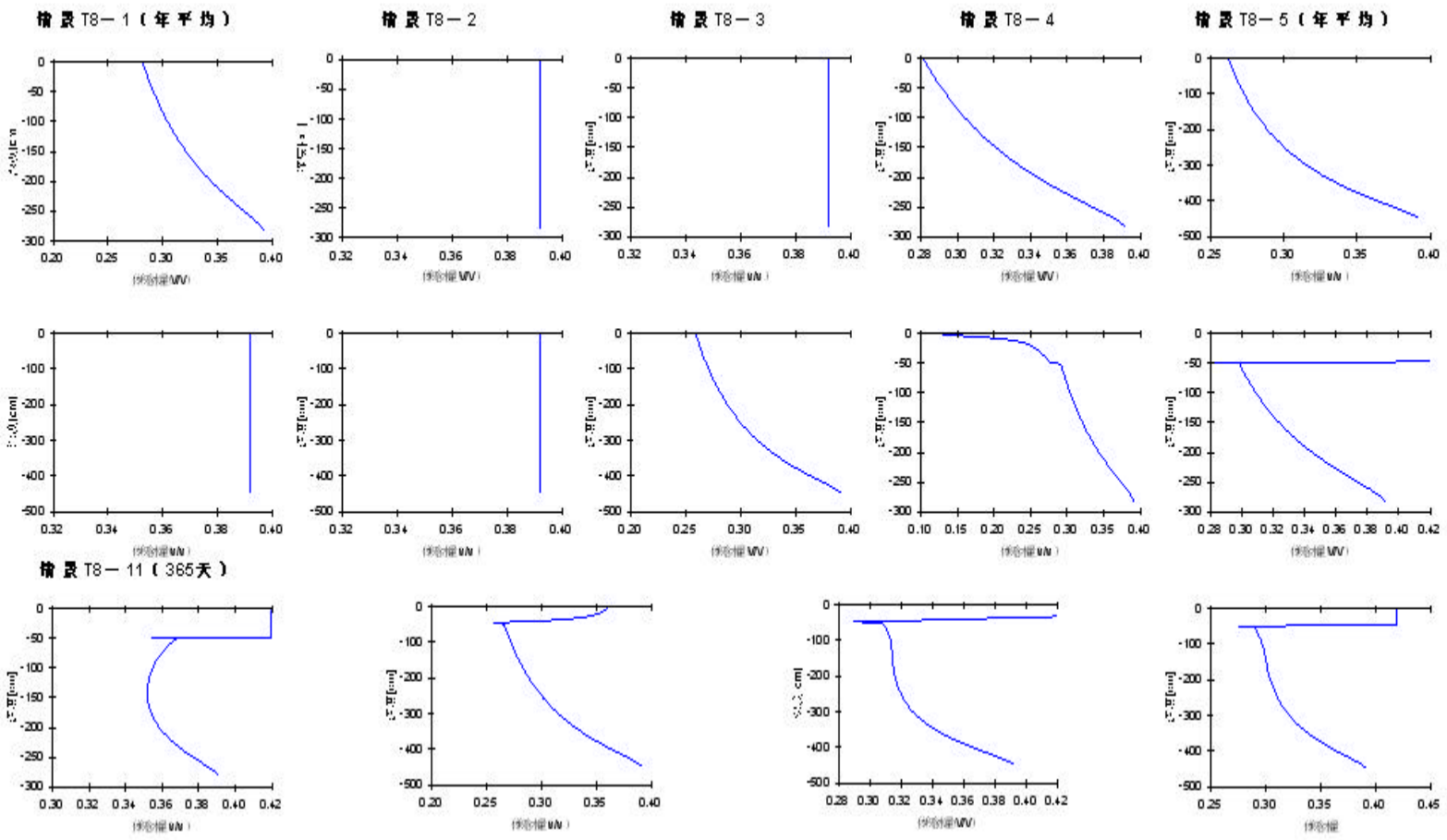


图 6－22 湖底 T8 剖面不同情景下的含水率随深度变化预测结果图

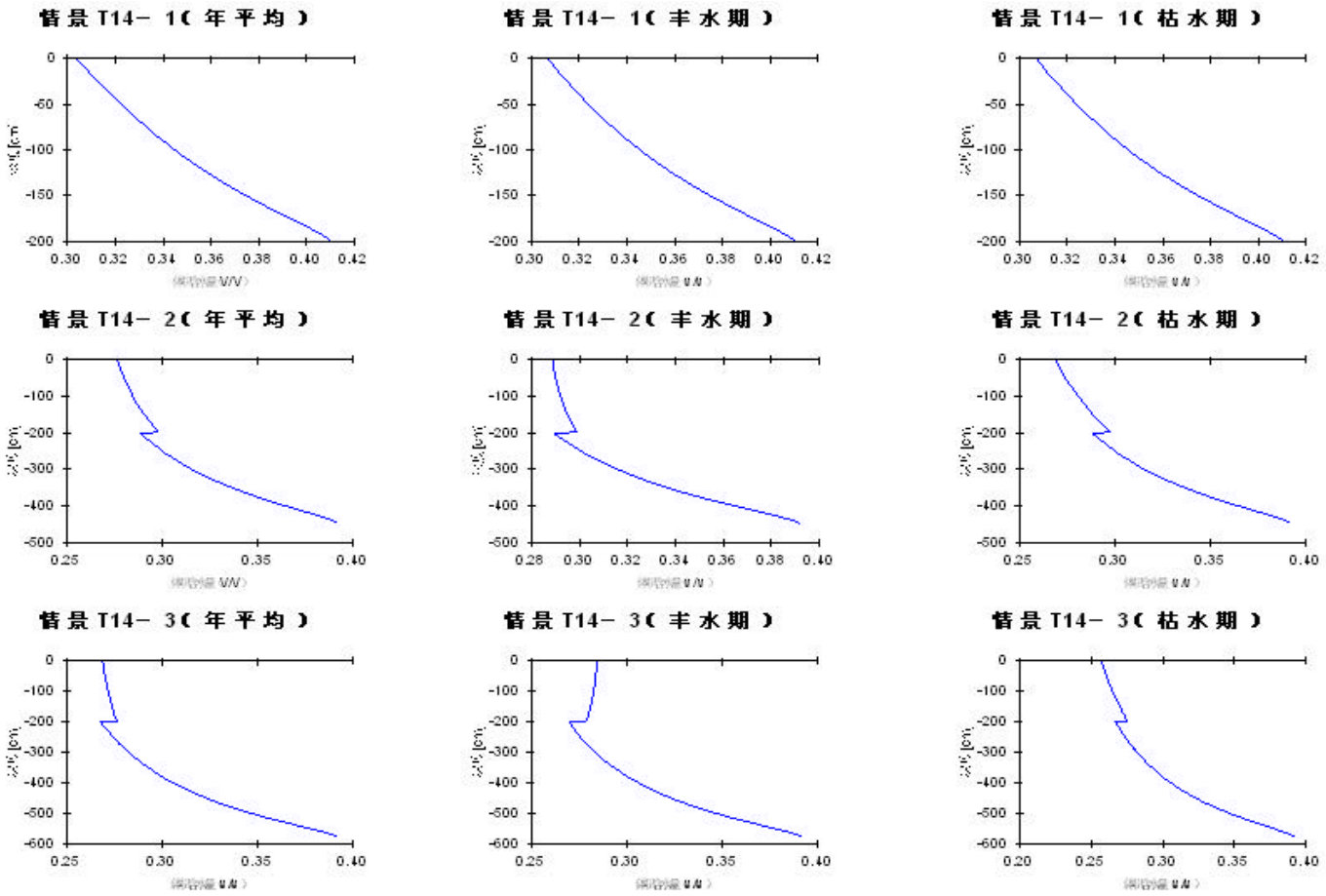


图 6－23 湖岸 T14 剖面不同情景下的预测结果图

按年平均降水和蒸发计算，包气带含水率随地下水水位埋深而变化。在上边界相同的情况下，不同深度上的含水率随潜水位埋深的变化情况见图 6－24 和 6－25。其中，上边界条件按枯水期净蒸发量 0.038cm/d 和干旱时单纯蒸发量 0.115cm/d 两种情况考虑。

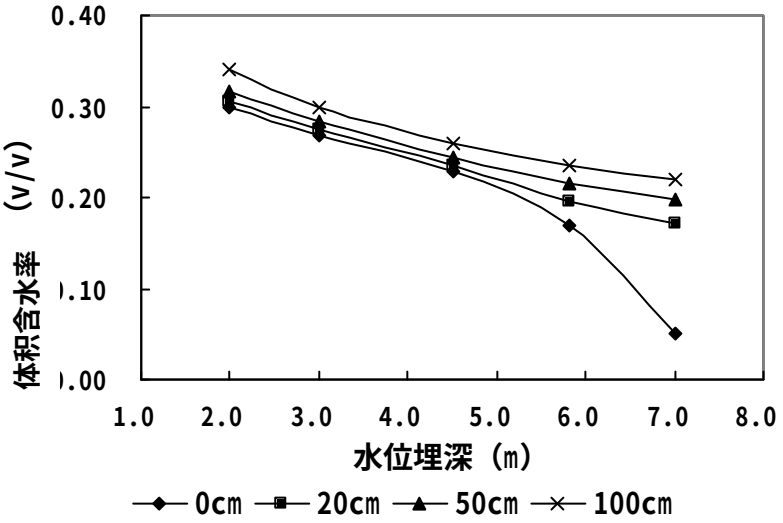


图 6－24　湖岸 T14 剖面蒸发量 0.038cm/d 时土壤含水率与水位埋深关系曲线

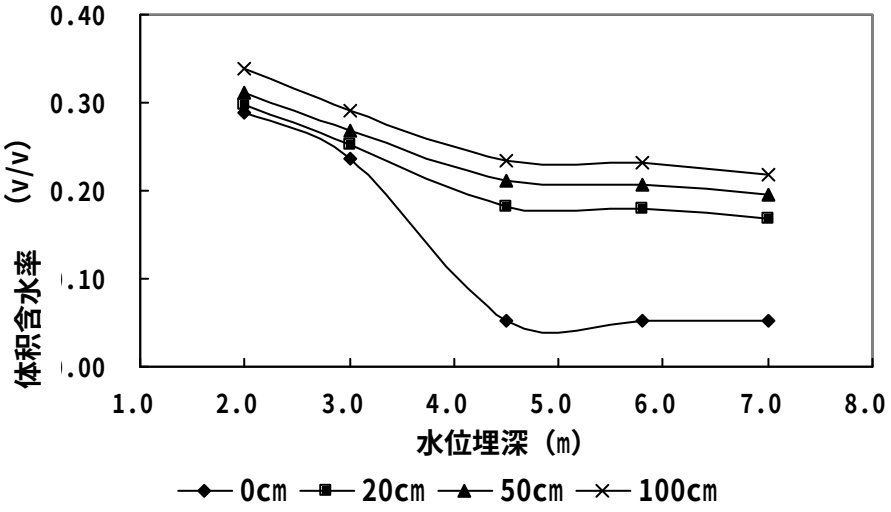


图 6－25　湖岸 T14 剖面蒸发量 0.115cm/d 时土壤含水率与水位埋深关系曲线

同一深度上土壤含水率随地下水位埋深增加而减小；当上边界蒸发量增大时，同一深度土壤含水率也有不同程度减小，表层含水率甚至接近残余含水率。

6.5.2 饱和带地下水影响预测评价

饱和带地下水流场分析的目的是评价不同情景下园区和区域地下水流场的变化状况，以及不同防渗条件下圆明园区地表水与地下水的交换量。根据地下水环境质量评价的要求，设定四种不同情景下圆明园区地表水渗漏补给地下水量和不同补给条件下地下水水位变化状况。

1. 情景设定

本次环评对防渗工程在多种情景和工况下的地下水影响进行了模拟分析，情景和工况条件和设定理由详见第 10 章。情景设定见表 6－25。

表 6－25 情景设定

情景		情景条件
情景 I		防渗工程实施之前
情景 II	II-1	按照防渗工程设计全部铺膜防渗，水量保证率 100%
	II-2	按照防渗工程设计全部铺膜防渗，按照水量保证率的 75%设定湖水位
	II-3	按照防渗工程设计全部铺膜防渗，按照水量保证率的 20%设定湖水位
情景 III	III-1	改进方案，按设计水位运行
	III-2	改进方案，按照水量保证率的 75%设定湖水位运行
	III-3	改进方案，按照水量保证率的 20%设定湖水位运行

2. 模型平台概述

本次地下水流场评价模型选择 Visual Modflow 模型平台，是国际地下水模拟中心（IGWMC）的标准软件。Modflow 是一个结构化的有限差分三维模型，该模型对密度恒定的地下水水流地三维运动方程用下面的偏微分方程来描述：

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z})-w=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (6-7)$$

其中，K_{xx}，K_{yy}，K_{zz} 为 x，y，z 轴上的水力传导率，（Lt^{-1}）；h 为地下水水头（L）；

w 为单位体积的通量（t^{-1}）；Ss 为多孔介质的弹性储水系数（L^{-1}）；t 为时间。

方程（6－7）描述了在非均质、各向异性介质中地下水非稳定运动规律。对于地下水流的偏微分方程，可以通过离散将其转变为差分格式，也可以针对每个水力单元，应用连续方程推导出其水流方程的差分格式。对于某一个水力单元，它的连续方程可以表示为

$$\sum Q_i = SS\frac{\Delta h}{\Delta t}\Delta V \tag{6－8}$$

其中，Q_i 是流进该水力单元的流量（Lt^{-1}），$\triangle V$ 是水力单元的体积，$\triangle h$ 是在 $\triangle t$ 内的水头变化。那么对于水力单元（i，j，k），共有六个水力单元同它相邻。

从水力单元（i，j–1，k）流入的水量根据 Darcy 定律为

$$q_{i,\,j-1/2,k} = KR_{i,\,j-1/2k}\,\Delta c_j\,\Delta v_k\,\frac{(h_{i,\,j-1,k} - h_{i,\,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \tag{6－9}$$

令 $$CR_{i,\,j-1/2,k} = KR_{i,\,j-1/2k}\,\Delta c_j\,\Delta v_k / \Delta r_{j-1/2} \tag{6－10}$$

则：$$q_{i,\,j-1/2,k} = CR_{i,\,j-1/2,k}(h_{i,\,j-1,k} - h_{i,\,j,k}) \tag{6－11}$$

其中，q 为通过两个水力单元间界面的流量；KR 为两个水力单元之间的渗透系数；$\Delta c\Delta v$ 为过水断面面积；r 为两个水力单元之间的距离；CR 为水力传导率。

除了同单元（i，j，k）相邻的六个水力单元流入的水流之外，还会有一些如河流、水井、蒸发等同水力单元发生水力联系。这些源汇项仅仅同接收单元的水头有关系，有的甚至同接收单元的水头也没有关系。对于其中的第 n 个源汇项，可以用下式表示

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n}h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \tag{6－12}$$

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^{N} p_{i,j,k,n}\ ,\quad Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^{N} q_{i,j,k,n} \tag{6－13}$$

对于水力单元（i，j，k）的所有的外部源汇项可以表示为

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \tag{6－14}$$

则式（6－2）可以表示为

$$\begin{aligned} &q_{i,\,j-1/2,\,k} + q_{i,\,j+1/2,\,k} + q_{i-1/2,\,j,k} + q_{i+1/2,\,j,k} + q_{i,\,j,k-1/2} \\ &+ q_{i,\,j\ k+1/2} + QS_{i,\,j,k} = SS_{i,\,j,k}\frac{\Delta h_{i,\,j,k}}{\Delta t}\Delta r_j\Delta c_i\Delta v_k \end{aligned} \tag{6－15}$$

在 m 时刻时，

$$(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t})_m = \frac{h^m{}_{i,j,k} - h^{m-1}{}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \qquad (6-16)$$

由此得到地下水水流方程的差分格式

$$CR_{i,j-1/2,k}(h^m{}_{i,j-1,k} - h^m{}_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k}(h^m{}_{i,j+1,k} - h^m{}_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k}(h^m{}_{i-1,j,k} - h^m{}_{i,j,k})$$
$$+ CC_{i+1/2,j,k}(h^m{}_{i+1,j,k} - h^m{}_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2}(h^m{}_{i,j,k-1} - h^m{}_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2}(h^m{}_{i,j,k+1} - h^m{}_{i,j,k})$$
$$+ P_{i,j,k}h^m h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k)\frac{h^m{}_{i,j,k} - h^{m-1}{}_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \qquad (6-17)$$

如果已知 $m-1$ 时刻各水力单元的水位，通过对模型中的所有水力单元建立同式（6－17）一样的方程，形成一个方程组。求解这个方程组就可以得到在 m 时刻的水位。依次类推，可以最终求得某个时段内地下水系统的水位。

3. 模拟区面积和网格剖分

该模型的模拟对象主要以清河古河道砂砾石孔隙潜水含水层。模拟区面积 24km^2。模拟区有限差分网格按照圆明园区 25× 25m，外围 50× 50m 进行剖分。结果见图 6－26。

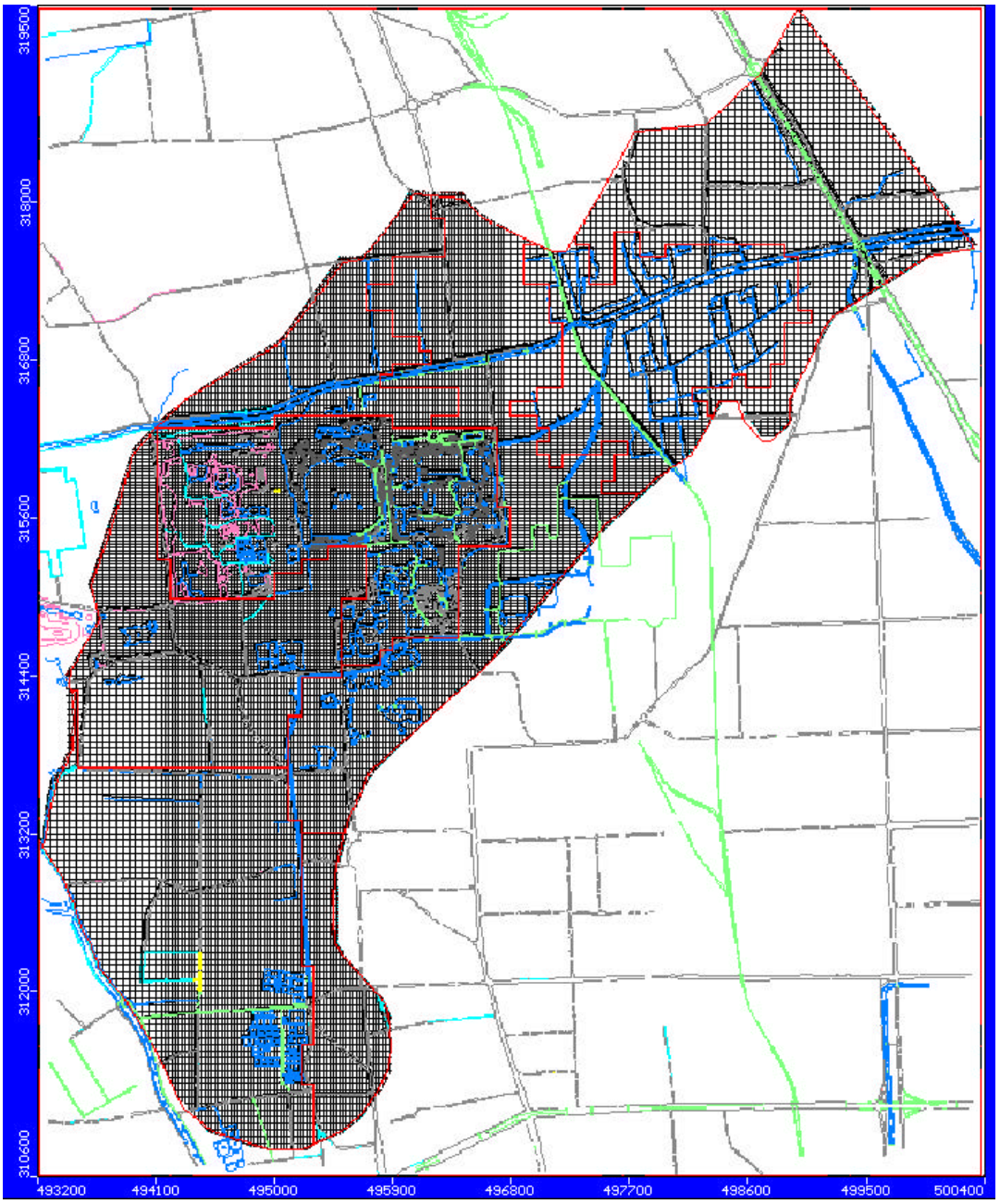


图 6－26 模拟区网格剖分图

4. 水文地质条件概化

1）模拟区域边界概化

基于评价区地层岩性分布，模拟区域上游边界概化为流量边界；模拟区域南、北部边界由于分布稳定的粘性土层，具有良好的隔水性质，概化为不透水边界；下游边界概化为流量边界；潜水含水层底边界为弱透水边界。

2）模型分层和参数分区

本次模拟垂向上分为三层，如下

第一层为潜水含水层，为本次地下水环境影响评价的目的层；

第二层为弱透水层，岩性为粘土或重质粘土，潜水和承压水含水层之间的越流层；

第三层为承压含水层，岩性为砂砾石层。

根据环境影响评价的要求，结合模型模拟含水层的岩性特征，在进行参数确定时，同一含水层水平方向上水力学参数在空间上是一致的。

基于评价区土地利用现状较为复杂，为便于模拟评价，根据有关资料和现场调查，对研究区域进行了分区。根据地形和建筑物的特点，尽量将硬化条件相似的地区划分在同一硬化分区内，使每个分区内的硬化地面比例接近，降水及灌溉的入渗系数相似。降水入渗系数的选取参照《海淀区水资源评价》，结合评价区包气带岩性和土地利用状况，区内渗透系数取值范围为 0.08～0.32。

基于本次防渗工程区水文地质勘察结果，潜水含水层和承压含水层之间弱透水层的渗透系数取值为 2.29×10^{-7}cm/s。

5. 不同情景地下水动态评价与分析

1）起始流场

评价区潜水动态受多种因素的影响，开采量分散、随机，变动较大。基于此，根据本次地下水影响评价的目的，参照实际监测的 2005 年枯水季节潜水位分布，形成起始流场，以此作为地下水影响模拟的参照流场。

2）不同情景下湖泊渗透系数选择

防渗工程实施前情景下的湖泊渗透系数按照实际渗透试验结果选取；情景 II 的湖泊渗透系数，在考虑侧渗条件下，按照 2%破损率确定；情景 III 的渗透系数，铺膜部分与情景 II 相同，粘土防渗部分按照水量交换的要求确定渗透系数。不同情景下湖泊渗透系数见表 6－26。

表 6－26 不同情景下湖泊渗透系数

	渗透系数（cm/s）				
情景	福海	绮春园	长春园		小南园
情景 I	3.3×10^{-5}	1.9×10^{-5}	3.3×10^{-5}		3.3×10^{-5}
情景 II	6.6×10^{-7}	3.8×10^{-7}	6.6×10^{-7}		6.6×10^{-7}
情景 III	6.6×10^{-7}	5×10^{-6}	铺防渗膜	铺粘土	1×10^{-5}
			6.6×10^{-7}	5×10^{-6}	

3）不同情景下地下水动态评价

不同情景下（表 6－25）的圆明园防渗工程区水渗漏量，评价区地下水位变化量、地下水流场变化范围。结果如表 6－27 所示。

表 6－27 不同情景地下水动态评价汇总表

情景			年渗漏量（$\times10^4m^3$）
情景 I	I-1*		363.4
	I-2**		203.0
情景 II#	II-1		48.5
	II-2		36.95
	II-3		9.96
情景 III	III-1	III-1*	133.7
		III-1**	133.7
	III-2		110.0
	III-3		29.9

注：*－非稳态湖水渗漏量；**－区域水位下降和开采长期干扰下湖水渗漏量；#－考虑侧渗

由表中可见，圆明园防渗工程区不同情景下湖水的渗漏量具有较大差异。防渗工程的实施，显著降低了湖水的渗漏量。对于防渗工程实施前，在不考虑区域地下水位和开采影响，区域地下水处于低水位条件下，非稳态湖水渗漏量为 363.4 万 m^3/a。如果叠加区域地下水位和开采干扰，非稳态湖水年渗漏量为 415.5 万 m^3/a；在区域地下水位和开采叠加长期干扰下，稳态湖水年渗漏量为 203.7 万 m^3/a。不同情景下潜水位变幅如图 6－27～图 6－29 所示。

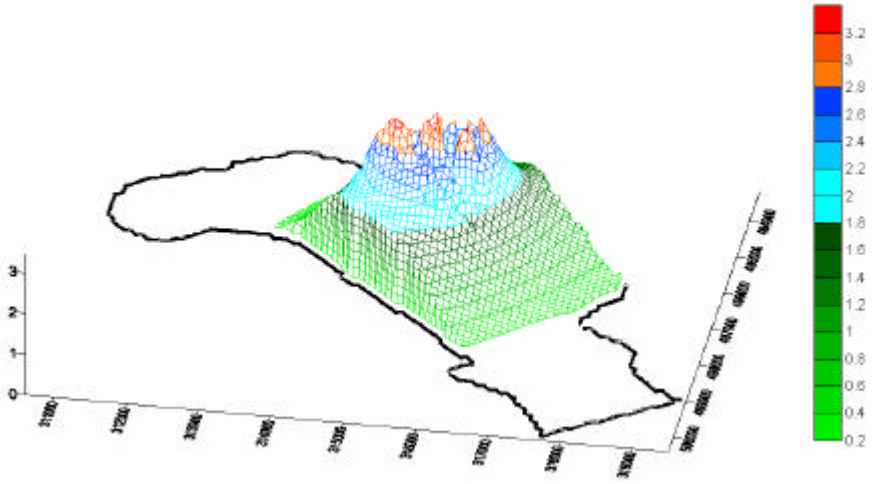


图 6－27 情景 I 湖水渗漏造成潜水位年变幅（m）

由于圆明园 2005 年处于防渗工程施工期，园区地面水体很小，湖水对地下水的补给微弱。另外由于叠加施工排水影响，评价区地下水位与 2003 年水位相比下降明显，园区水位降幅 2.0~2.5m，局部处于疏干状态。在颐和园东部、清华西北门和大石桥形成规模不等的降落漏斗，明显改变了地下水天然流动状态，并在圆明园区内形成明显的地下水分水岭。

由图 6－27～图 6－29，不同情景下模拟 365d 非稳态状况下地下水位年变幅差异明显。全部防渗工程的实施（情景 II）降低湖水的渗漏量，地下水来自湖水渗漏补给量显著减少，最高水位增幅（情景 II-1）仅为 0.5m。情景 III 则在一定程度上提高了地下水位，最大潜水水位年增幅大于 1.0m。

为对比不同情景方案湖泊渗漏下不同地下水位升幅的影响范围，将地下水位年升幅分为>0.1m、>1.0m 和>2.1m，其相应的影响面积如图 6－30 所示。

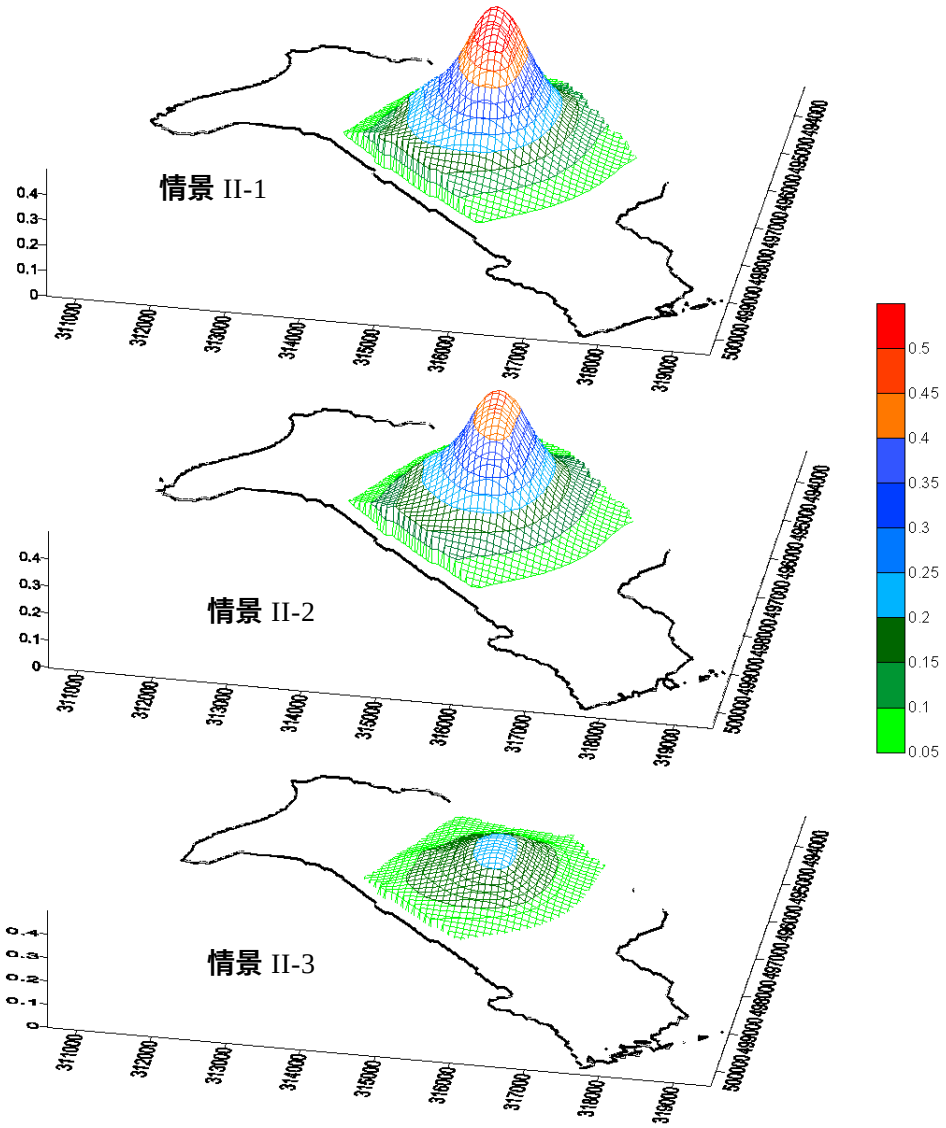


图 6－28 情景 II 潜水位年变幅（m）

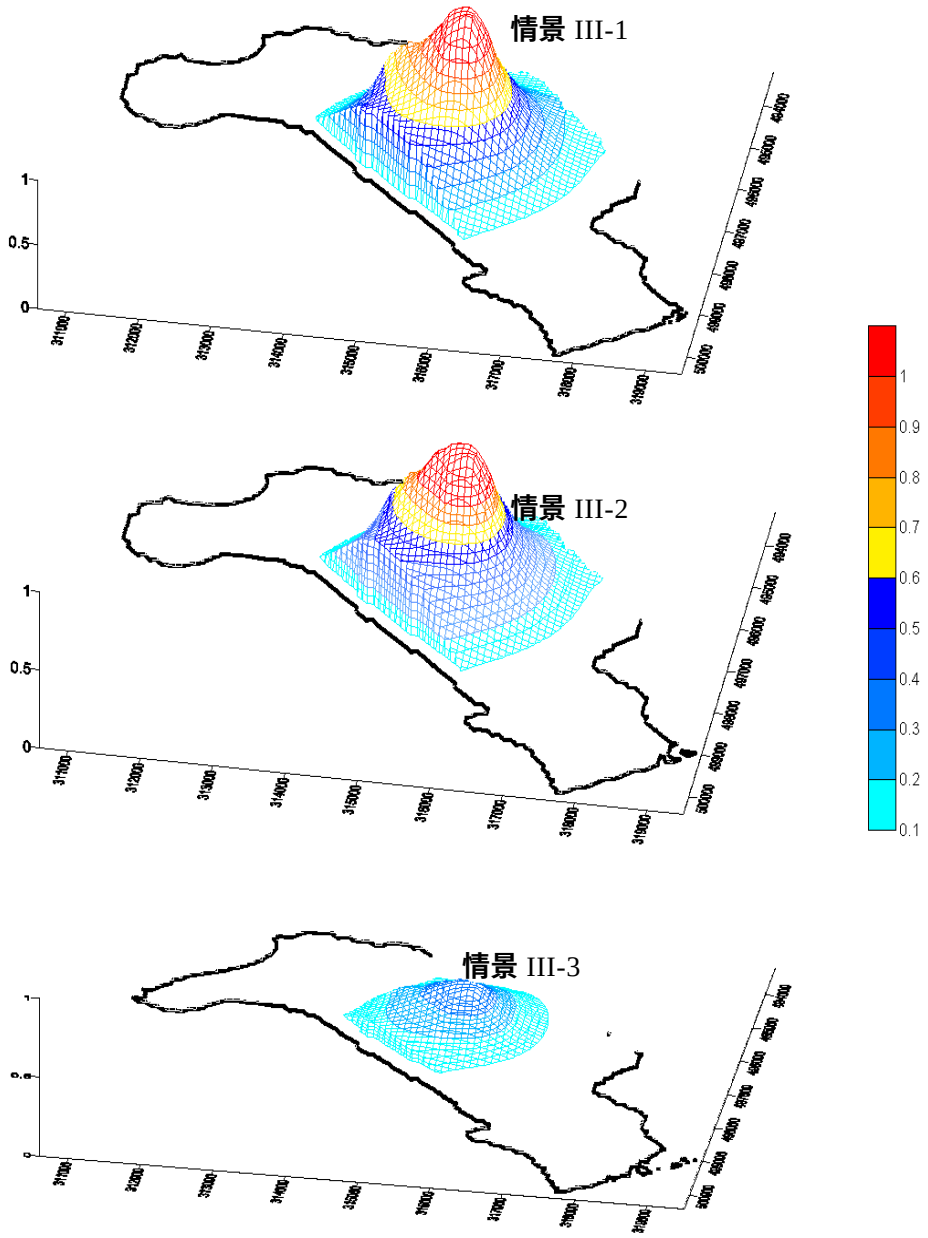


图 6－29 情景 III 潜水位年变幅（m）

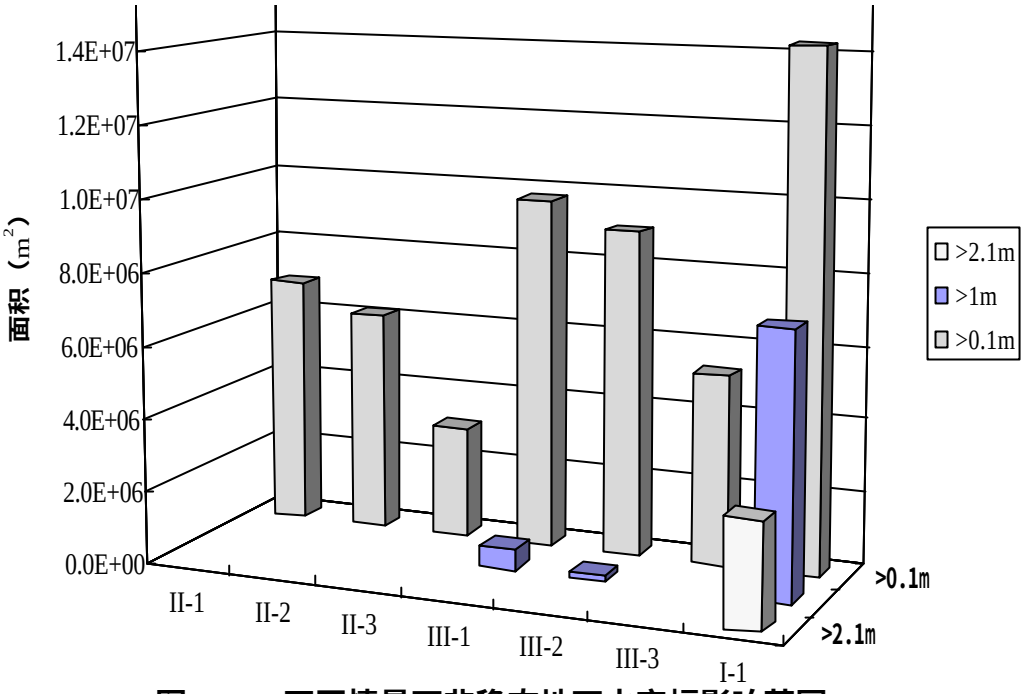


图 6－30 不同情景下非稳态地下水变幅影响范围

由图 6－30 所示，在未考虑区域地下水位变动和人工开采条件下，非稳态、不同情景下地下水接受湖水渗漏补给的影响范围差别较大。情景 I 的影响范围为最大，约 14km^2；情景 II-3 的影响范围最低，仅 4.5km^2，局限在圆明园及临近周边地区。

由于 2005 年区内施工排水，气候干旱，加之圆明园区由于防渗工程施工而湖泊处于干涸状态，区域潜水位与 2003 年相比显著降低。

考虑到近 10 年间，评价区潜水水位持续下降 3～4m。因此，为确定气候干旱和开采影响下潜水水位持续下降条件下，不同情景湖水渗漏与地下水动态的关系，本次地下水影响模拟评价过程中，通过叠加开采，评价情景 II-1 和 III-1 下湖水渗漏对地下水变幅的影响，结果见图 6－31～图 6－34 所示。

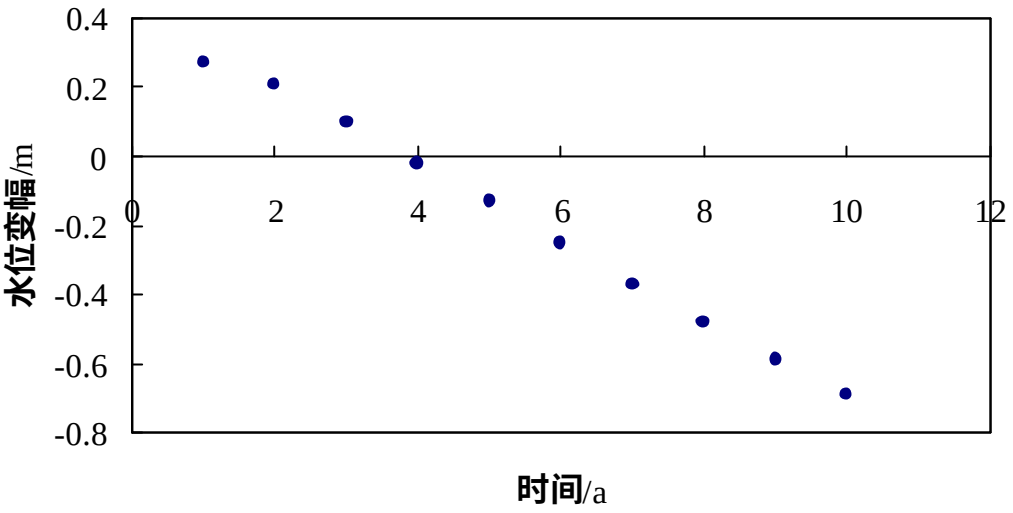


图 6－31 情景 II-1 下福海下部地下水动态变化

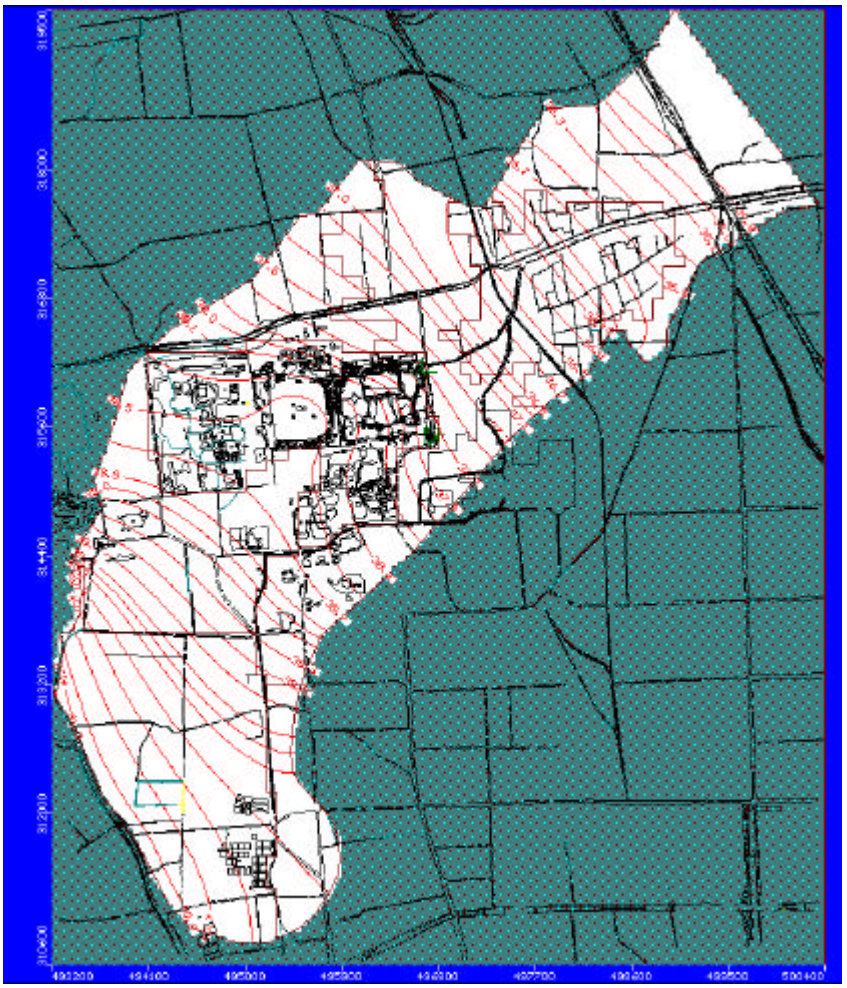


图 6－32 情景 II-1 下地下水流场分布图（预测期为 10a）

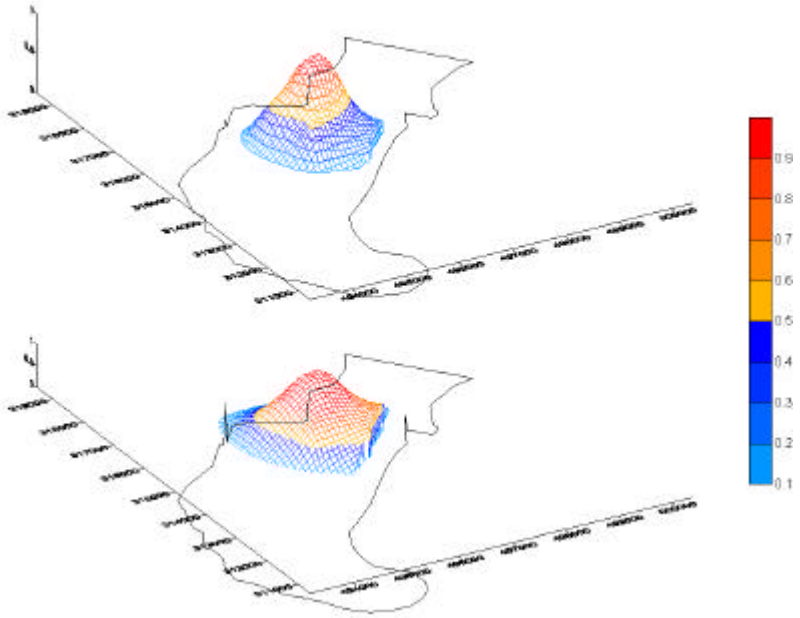


图 6－33 情景 III-1 下地下水动态变化

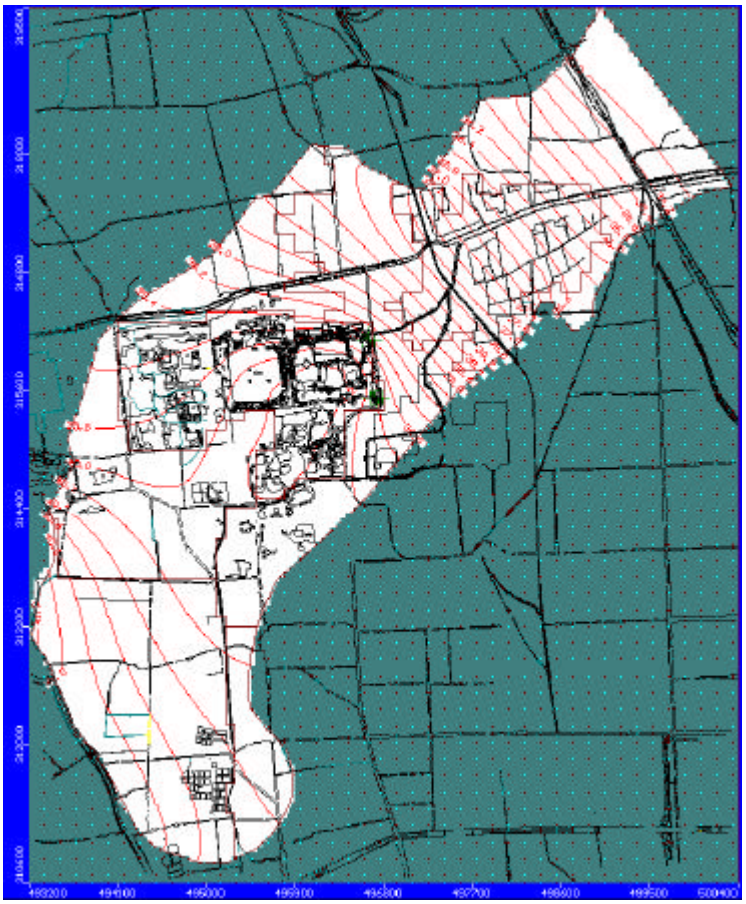


图 6－34 情景 III-1 下地下水流场分布图（预测期为 10a）

由于气候干旱、局部地区施工排水和圆明园湖泊处于干涸状态，区域潜水位与 2003 年相比显著下降。若圆明园东部全部采用土工膜防渗，湖水年渗漏量为 48.5 万 m^3。区域地下水位仍以现状下降，依此长期运行，圆明园区的潜水位仍将持续下降。若撤除部分复合土工膜，利用粘土代替，湖水年渗漏量 133.7 万 m^3，依此长期运行，尽管区域地下水位存在下降趋势，但局部改变潜水位下降趋势，造成圆明园及其周边 5.76km^2 区的潜水位较现状具有 0.1～1.0m 的升幅。

6.6 结论

（1） 圆明园坐落在清河古河道，在岩性上形成相对封闭的局部潜水含水层。潜水含水层一般厚度为 5～7m、平均过流断面宽 2500～3000m，渗透系数 110m/d。下伏承压含水层，渗透系数为 118m/d。潜水含水层通过上、下游径流和微弱越流交换，与周边地下水发生水力联系。

（2） 天然条件下，地下水流由西向东流动，圆明园处于潜水径流带上。由于受到连续干旱和局部地下水开采的影响，区内地下水位自 1997 年以来呈持续下降趋势，潜水位和承压水头分别下降了 2.5m 和 11m。尤其是施工排水，强烈干扰地下水的天然流场，局部改变地下水流向。

（3） 根据区内湖底土层性质勘查与圆明园东部防渗工程施工设计，区内湖泊存在有厚度不等的底泥层。现场渗水试验测得其渗透系数为（1.7~3.3）$\times 10^{-5}$cm/s。由于绝大部分湖底沉积层已被彻底破坏，因此底泥层的分布范围与厚度已难以确认。

（4） 膜下地层渗透性现场渗水试验结果表明，不同湖泊的渗透性具有较大差异。绮春园粘性土层的渗透性较低，渗透系数 10^{-5}cm/s 左右；福海和长春园区中砂、砂砾石地层渗透性强，渗透系数为 10^{-1}～10^{-3}cm/s。

（5） 园区内土壤含水率测定结果显示，地表以下 15cm 处的土壤含水率，绮春园为 0.18～0.24，圆明园西部和长春园为 0.08～0.10 之间，福海及周边地区的湖底裸露区含水率仅为 0.06～0.08，表现为极度干旱。

（6） 同一深度上土壤含水率随地下水位埋深增加而减小；当上边界蒸发量增大时，同一深度土壤含水率也有不同程度减小，表层含水率甚至接近残余含水率。

（7） 防渗工程实施前，若不考虑区域地下水位的持续下降，圆明园东部湖水最大渗漏量为 363.4 万 m^3/a。因湖水渗漏引起的潜水位抬升（0.1m 以上）的影响范围约为 $14km^2$。渗漏量分别占到北京市和海淀区的地下水资源总量的 0.14%和 1.5%；地下水水位影响范围分别占北京市和海淀区总面积的 0.06%和 2.35%。

（8） 由于气候干旱、局部地区施工排水和圆明园湖泊处于干涸状态，区域潜水位与 2003 年相比显著下降。若圆明园东部全部采用土工膜防渗，湖水年渗漏量为 48.5 万 m^3。区域地下水位仍以现状下降，依此长期运行，圆明园区的潜水位仍将持续下降。若撤除部分复合土工膜，利用粘土代替，湖水年渗漏量 133.7 万 m^3，依此长期运行，尽管区域地下水位存在下降趋势，但局部改变潜水位下降趋势，造成圆明园及其周边 $5.76km^2$ 区的潜水位较现状具有 0.1～1.0m 的升幅。

（9） 潜水和承压水水环境质量现状评价结果显示，潜水质量极差占 66.7%，较差占 33.3%。主要污染因子为氨氮、亚硝酸盐、挥发酚、高锰酸盐指数和总硬度等。区域深层承压水的水环境质量状况较好，良好占 100%。