

东北大学
硕士学位论文
永定河冲洪积扇地下水分析与评价
姓名：白雪峰
申请学位级别：硕士
专业：应用化学
指导教师：朱龙
2003. 1. 1

永定河冲洪积扇地下水分析与评价

摘 要

为澄清永定河水系官厅-卢沟桥段水体氮污染状况, 分别于 2001 年 4 月至 2001 年 10 月多次采地下水样分析和测试了永定河冲洪积扇浅层地下水氮素污染状况及其域分布, 结果表明:

永定河冲洪积扇浅层地下水氮形态主要是硝酸盐氮和氨氮, 有机氮和亚硝酸盐氮含量很低。多数地区硝酸盐氮含量在 5.0-20.0mg/L 之间, 氨氮含量在 0.2-0.5mg/L 之间。

地下水氨氮分布与硝酸盐氮明显不同, 山前冲洪积扇地下水氨氮含量明显低于河床阶地, 并沿河床方向分别在永定镇和衙门口-郭庄子形成氨氮污染晕圈。其中永定镇氨氮晕圈平均含量大于 0.4mg/L, 并沿下游方向逐渐降低; 衙门口-郭庄子氨氮晕圈平均含量大于 0.5mg/L, 山前及冲积扇顶部地下水氨氮平均含量一般小于 0.2mg/L。丰水期地下水硝酸盐氮含量一般降低, 氨氮含量却急剧增加。

(地下水硝酸盐氮分布主要受地下水埋藏深度和含水层岩性结构等因素影响。其中, 冲洪积扇顶部与河床阶地地下水硝酸盐氮含量相对较低; 山前洪积扇顶部硝酸盐氮含量相对较高, 并沿山前侧向径流方向逐渐减少。)

关键词: 氮形态, 硝酸盐氮, 氨氮, 永定河冲洪积扇;

The Analysis and Evaluation of Groundwater from Yongdinghe Water Alluvium

Abstract

In order to expound the process of nitrogen contamination between Guanting and Lugouqiao reaches in the Yongdinghe water system, we investigated nitrogen species distribution in shallow ground water in the Yongdinghe alluvium reaches in the period of April 2001 to October 2001. Investigation result revealed that:

As for groundwater, the mainly nitrogen species was nitrate and ammonia, which nitrate variety from 5.0mg/L to 20.0mg/L and ammonia variety from 0.2mg/L to 0.5mg/L in the spring, which below groundwater standard IV level, whereas organic nitrogen and nitrite was little. Nitrate distribution was obviously affected by groundwater deep and aquifer lithology where piedmont diluvium remain higher concentration than that of alluvium top and riparian, and decreased by the follow of groundwater stream; Ammonia distribution was quite different from nitrate otherwise, which was remain two haloes of high concentration ammonia around Yongding town and Yamenkou-Guozhuangzi village. The former halo contained above 0.4mg/L average and decrease along river way and the latter halo contained about 0.50mg/L and decrease in piedmont and diluvium top where ammonia below 0.20mg/L average. Groundwater nitrate in the spring generally decrease and then augment in the fall, however, whereas ammonia dramatically increase in the fall than that of in the spring.

Keywords : nitrogen species, nitrate-nitrogen ,ammonia-nitrogen, Yongdinghe alluvium

声 明

本人声明所呈交的学位论文是在导师指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本人签名：白雪峰

日 期：2003. 1. 15

第一章 引言

1.1 研究区域概

1.1.1 自然地理条件

北京市介于东经 115 度 30 分至 117 度 30 分,北纬 39 度 30 分至 41 度之间,位于华北平原的北部边缘。全市面积 16800 平方公里。北京的西部和北部为连绵不绝的群山,山峰俊俏,沟谷纵横。北京西山属太行山山脉。北山统称军都山属燕山山脉。最高山峰为西部的灵山,标高 2300 余米。其次为延庆北部的海坨山,标高 2230 米。东南部为冲积、洪积平原,面积约 6200 平方公里,占全市总面积的 38%左右。平原由西北向东南缓缓倾斜,与广大的华北平原相连,地面标高由 60 米逐渐降到 10 米。在北京西北部山区,延庆盆地镶嵌其中,地面标高 490-520 米,地势由东北向西南倾斜。此外,山前地带,还有少数孤山残丘分布。

1.1.2 气候条件

北京地区属于暖温带湿润季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。平原地区多年平均气温 12℃,一月份最低,平均气温-4℃,最热月份在 7-8 月,平均气温为 26℃。海拔 500 米以上的山区,年平均气温为 8℃。北京降雨量多年平均为 635 毫米。西部和南部的山前地带,年平均降雨量为 700 毫米;北京平原年平均降雨量约 600 毫米;延庆、房山、门头沟西部山区和怀柔北部山区,年降雨量 400-500 毫米。年降雨量多集中在 7、8、9 三个月,占全年降雨量的 60-80%,水面蒸发量平均约 1800 毫米。

1.1.3 第四系地质

第四系(Q)广泛分布于山间沟谷及广大平原地区,沉积厚度各处相差悬殊,主要受古地形控制。总的规律是从山前到平原逐渐增厚,由数米增加到二、三百米。其中有几个重要的沉积中心:八宝山北至杜家坎、小屯一带,沉积厚度

250 米左右；怀柔庙城、彩各庄、杨宋各庄一带，厚度约 300 余米；昌平马池口、横桥村、楼各庄一带，厚度 500 余米；顺义至天竺一带，沉积厚度达 500 米以上；平谷盆地中心厚约 500 余米；延庆为一断陷盆地，第四系厚度可达千余米。第四纪沉积物为粘性土、粘性土含碎石、砂卵石、砂砾石、砂、淤泥等。由于第四系成因类型复杂，研究程度不够，因此分层时代，成因类型还不精确划分，但就其岩性相变规律来看，从山前到平原：山坡及山前丘陵地带，多为残积、坡积碎石粘性土；山前多为洪积粘性土与砂卵、砾石层互层；平原地区为冲积平原，主要为河流相和湖相沉积物粘性土、砂砾石、砂互层。

1.1.4 水文地质条件

目前北京地区地下水开采深度大部分在 150 米以上，根据 150 米内含水层的岩性结构及富水性，划分两个含水岩组。

(1) 砂卵石、砂砾石、砂层含水岩组：分布于广大的平原地区，其成因主要为洪积、冲积、冰水沉积物。根据富水程度划分五个不同的富水区（富水程度按降深 5 米时单井涌水量立方米/日）。

富水性大于 5000 立方米/日地区：分布在永定河、潮白河、拒马河、大石河和柁河冲积洪积扇。含水层为单一和一至二层砂卵石、砂砾石层。厚度各地不一。城西永定河冲积、洪积扇，在八宝山以南，砂卵石厚度小于 30 米；八宝山以北的闵家庄、小屯村至昆明湖地区，砂卵石厚度达 70 米以上。潮白河冲洪积扇砂卵石、砾石层厚度 30-70 米不等，年丰附近则大于 70 米；大石河冲积、洪积扇砂卵石、砾石层厚度小于 20 米；柁河洪积扇砂卵石厚度大于 70 米。上述地区含水层渗透系数 300-500 立方米/日，透水性好。地下水多为潜水。水位埋深在山前 15-30 米，向下游逐渐变浅，甚至溢出地表。该地区砂卵石埋藏较浅，在上游地区直接裸露地表，极易接受降水和河水的渗入补给，是地下水的良好补给区，也是平原地下水资源最丰富的地区。

富水性 3000-5000 立方米/日地区：多分布在上述地区的外围。如大石河芦村、丁各庄、交道镇一带；北京城区东部，大兴黄村一带；南口以南土楼、北小营一带；顺义杨各庄、南彩；平谷杨桥、岳各庄、马坊等地。含水层主要由 2-3 层砂砾石或多层砂砾石组成。主要含水层顶板埋藏深度小于 20 米，累积厚度 20-50 米。多为承压水，水头埋深除南口地区及北京东郊集中开采地区大于 20 米外，一般小于 12 米。在延庆盆地，该区分布在下花园以北至鲁各庄和苏村一带，含水层有多层砂砾石、粗砂组成。厚度大于 40 米，水位埋深一般在 20-30 米左右。

富水性 1500~3000 立方米/日的地区：分布面积最广，约占北京平原面积的二分之一。含水层主要由多层砂砾石、砂组成。层次多而薄，单层厚度小于 10 米，累积厚度一般在 30 米以上，顺义、通县一带则大于 50 米。水头埋深一般小于 12 米，山前及集中开采区大于 12 米。在延庆盆地，该区分布在延庆东北至大柏老、永宁及康庄一带。含水岩性多含粘砂砾石和砂层，砾石有风化现象，局部呈半胶结状。累积厚度 20~40 米不等。永宁附近较厚。水头埋深 10~20 米，但在妫水河两岸可自流。

富水性 500~1500 立方米/日的地区：主要分布在沙河、昌平一带；大兴县的黄村东南，庞各庄以东及礼贤、采育一带；通县永乐店以南地区。含水层岩性以砂为主夹少量砂砾石层。层次多而薄，单层厚度小于 10 米，累积厚度 30~50 米，渗透性差。为承压水，水头埋深一般小于 5 米。在延庆盆地，该地区分布在延庆、下屯、东杏园一带，含水层主要以砂为主，山前地区有粘砂砾石层，单层厚度一般小于 3 米，累积厚度小于 20 米。盆地中部一定深度内地下水可以自流，如八里店钻孔，孔深 80 米时，自流水头高出地面 0.88 米，140 米以下自流水头高出地面 1.18 米，越深水头越高。

富水性小于 500 立方米/日的地区：仅分布在昌平百善庄以北和永丰屯一带。含水层多由粉、细砂组成，层次少而薄，是比较缺水的地区。在延庆盆地，分布在延庆城西至官厅水库边缘。含水岩性主要为粉、细砂层，单层厚度一般小于 3 米，累积厚度小于 20 米，局部地区甚至无含水层。地下水具有承压性，深部可自流。如太平庄北官厅附近（4916-1）号钻孔，孔深 202.07 米，水头高出地面 4.27 米。

（2）砂碎石、砂卵石含水岩组：主要分布在山麓、山间沟谷及山前一带。多为坡积洪积和冰积物。岩性多为粘砂碎石，透水性能差，一般水位埋藏较深，多为缺水地区。但是在局部山间凹地，山前间歇性河谷地带，也有较好的砂卵石透镜体。富水性能好，如密云前栗园、坛营及怀柔山牵一带，单井出水量可达 500~1000 立方米/日。

1.1.5 地下径流

潜水分布在山前冲积洪积扇的顶部及广大平原区的浅层。主要接受大气降水渗入补给。其次是河水、灌溉水的渗入补给，大气降水控制了潜水的季节和多年变化，每年最低水位出现在雨季前 5~7 月，高水位出现在 8 月中旬及 9 月上旬。年变化幅度山前 5~10 米，平原 1~3 米，潜水溢出带地区小于 1 米。改变潜水动态的因素主要有两方面。其一、河流及灌溉的影响：在河流补给地下水

的地段,河流动态的改变对地下水的影响较大。如永定河和潮白河上游分别修建了水库后,河水动态受人为控制,因而沿河一带的潜水主要受水库放水大小和时间的控制。年最低水位一般在水库放水前 4 月份。放水后水位迅速上升,最高水位出现在 8-9 月份。其二、长期集中开采影响:在北京近郊水源厂、东郊工业区及房山大石河水源地,由于过量开采,潜水位逐年下降。

西郊地下水与地表水一样,大致为自西向东流,处于本市地表、地下水的上游。由于八宝山岩基隆起,北京西郊地表水、地下水分为两支:一支流向水源三厂,是该厂补给水源,长河-清河水系是该地区水系的渗漏补充地区;另一支流向水源四厂,莲化河-凉水河水系是该地区地下水系渗漏补充地区。

地下水补给量包括侧向补给和垂向补给。其中侧向径流补给主要以基岩地下水径流,通过山前砂卵石层流入平原区。据计算,山前地下水断面流量枯水期为 19.75 亿立方米/年。其中北京平原 18.16 亿立方米/年,延庆盆地 1.59 亿立方米/年。垂向渗入补给主要为降水渗入补给量。北京山前地下水径流计算断面以下,整个北京平原区内的调节储量共计约 23.5 亿立方米/年。其中北京平原为 22.25 亿立方米/年,延庆盆地 1.0 亿立方米/年。因此,北京地区地下水的天然补给量约 43.0 亿立方米/年。地下水最大开采储量,实际上相当于地下水的天然补给量。但是地下水的补给量并不能全部被开采利用,其中一部分以地下径流方式流出境外,一部分消耗于潜水面蒸发、潜水溢出、植被蒸腾等。因此按照地下水天然径流量的 90%、地下水调节储量的 60%估计,全区开采储量为 31.6 亿立方米/年。其中北京平原约 29.6 亿立方米/年,延庆盆地为 2.0 亿立方米/年。又根据北京城区及近郊区地下水开采下降漏斗范围内的单位面积开采量经验数据,结合各地区含水层的富水性,按类比法近似计算,全区地下水开采储量约 30.3 亿立方米/年。

1.1.6 地下水污染

地下水作为人类生存空间的重要组成部分,为人类提供了优质的淡水资源。但是,随着我国环境污染的日趋严重,人类活动导致地下水污染以从点状扩散到面状污染。除地下水自身受污染外,又成为土地污染的重要媒介。含水层对污染源的敏感性、纳污的脆弱性及其与土地污染的相关性已引起行业专家的普遍关注。而且,土壤和含水层一旦受到污染,清除、治理、修复十分困难,不仅经济投入很大,技术上也有难度,时间周期也很长。根据全国 130 个城市和地区地下水水质统计分析,我国地下水整体质量较好,但多数城市地下水仍

元素主要为总硬度和矿化度,其次为硫酸盐、硝酸盐、氯化物和氟化物。该区总硬度和矿化度超标严重,特别是河北省的沧州市和廊坊市,总硬度超标严重,水质极差,许昌市细菌总数和大肠菌群超标明显。西北地区主要城市地下水污染超标组分有矿化度、总硬度、硝酸盐和硫酸盐,其次为氯化物、氟化物、亚硝酸盐和氨氮。东南地区主要城市地下水污染超标组分主要有亚硝酸盐、氨氮、铁和锰、总硬度和硝酸盐。另外,部分城市地下水呈酸性,PH 值超标严重。中南地区主要城市地区地下水污染超标组分主要有亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮、铁和锰,其次为总硬度、氟化物和 PH 值。铁和锰主要为原生环境引起的污染,污染普遍。西南地区主要城市地区地下水污染超标组分主要有总硬度、矿化度、亚硝酸盐、氨氮、铁和锰、其次为氟化物、硫酸物、有机酚、耗氧量和 PH 值。污染元素主要呈点状分布,超标率低。宗旨,我国地下水污染有如下特点:从污染程度上看,北方城市污染普遍较南方城市重,污染元素多且超标率高,特别是华北地区,污染最为突出。从污染元素看,“三氮”污染在全国均较突出,普遍遭受污染;矿化度和总硬度污染主要分布在东北、华北、西北和西南地区;铁和锰污染主要分布在南方地区。从变化趋势看,我国大多数城市地下水水质趋于稳定或略有减轻,部分城市地区地下水水质污染严重,应引起重视。

1.2 目前北京的水问题

北京位于水资源相对贫乏的海河流域,其用水人口超过 1400 万,有限的水资源和十分集中的用水需求成为困扰城市发展的长期矛盾。新中国定都北京以来,由于城市规模扩展迅速,先后出现过几次供水危机。六十年代中期的城市供水危机,依靠开挖京密引水渠从密云水库引水得以度过;七十年代中期的供水危机,依靠大量打井超采地下水得以度过;八十年代初连续五年干旱引起的供水危机,依靠压缩 200 万亩灌溉面积和国务院决定密云水库作为北京的专用水源才得以度过。近 20 年来北京的人口和经济规模又有了空前增长,尽管大力推进了计划用水和节约用水,但水资源供需态势仍不容乐观,再次出现水危机的可能性确实存在。

引发未来水危机的首要因素是用水需求超出了区域水资源的承载能力。与1949年相比,北京市的总用水量增长了40倍,城市自来水售水量增长了1985倍。从区域水平衡角度看,长期维持40亿立方米的原水年供水量就要挤占生态环境用水,目前北京市的实际供水量已超过这一数值。

第二个因素是丰枯交替不均匀。北京地区降水的特点,一是年内高度集中,每

年6—9月的降水量占年降水量的85%左右；二是年际变化大，最小年降水量为46亿立方米，而最大年降水量可达236亿立方米；三是丰枯连续出现的频率较高，一般连丰或连枯时间为2—3年，最长连丰6年，最长连枯9年。由此导致汛期易于发生洪涝而枯水期往往供水紧张，这就对工程调控能力和水资源统一管理提出了更高的要求。

第三个因素是水污染趋势加剧。非汛期流入官厅水库的水体基本是污水，河北宣化以下的河水基本为超V类，1997年后官厅水库已不能作为生活饮用水源。由于密云水库上游地区酿造和铁矿采选业的发展，潮河戴营断面铁离子浓度常年超过V类标准，对北京首要水源地形成威胁。同时，由于市区污水集中处理率尚未达到50%和面源污染大量存在，北京地表水和地下水的水质在继续下降。

第四个因素是上游用水量增加导致入境水量的急剧减少。官厅水库的10年平均入库水量，五十年代为19.3亿立方米，九十年代仅为4.0亿立方米。官厅水库1985—1995年的年均来水为2.7亿立方米，而1955—1984年的年均来水为11.3亿立方米，两个时段的平均降水量基本相等，可见入库水量衰减得相当明显。

第五个因素是地下水严重超采引起的自产水量减少。目前北京地下水累计超采量已超过40亿立方米，其中规划市区超过18亿立方米，形成了面积达2000平方公里的降落漏斗。地下水位下降导致各项垂直补给量急剧减少，形成了越超采地下水其资源量越下降的恶性循环，并易于引发多种地质灾害。

第六个因素是尚未确立水资源统一管理机制。管理体制上仍存在条块分割，管理职能还有交叉，水价在几次调整后仍然偏低，水资源的配置、开发、利用、治理、节约、保护等管理权属还不统一。这就难以实现统一管理和调度，特别是不利于水危机期间的统一管理。

为缓解这些制约北京及其周边地区水资源可持续利用的重大因素，国家水行政主管部门和北京市一直在采取多种措施并取得了明显成效。在用水总量多年来基本保持稳定的情况下，北京市的经济取得了长足发展，从一个方面体现了内涵发展模式。最近北京市和水利部联合制定的《21世纪初期首都水资源可持续利用规划》，按照一要强化保护、二要厉行节水、三要统一管理、四要合理配置的总体思路，为解决南水北调工程实施前北京及其周边地区的水资源短缺、水环境污染和生态失衡问题制定了可行的对策措施，也为类似地区形成其符合自身特点的水资源合理利用模式提供了借鉴。

1.3 研究现状

缺、水环境污染和生态失衡问题制定了可行的对策措施,也为类似地区形成其符合自身特点的水资源合理利用模式提供了借鉴。

1.3 研究现状

北京地区水文地质工作是随着北京城市建设和工农业生产的发展而不断向前发展的。以五十年代水文地质普查开始,首先在北京城近郊区及良乡、黄村、沙河等城镇开展供水水文地质勘察。六十年代转变为农田供水水文地质勘察。七十年代水文地质工作开始向纵深发展,开展部分区县第四系深层地下水和隐伏基岩水勘察,同时进行了水文地质综合研究和编图工作。八十年代进一步明确北京水文地质工作应以城市供水为中心,围绕北京城市供水开展了专题水文地质调研,以及地下水人工调蓄和监督管理工作。九十年代继续以城市供水为中心,为北京城市供水寻找应急备用地下水源地和卫星城镇供水水文地质勘察,继续开展地下水人工调蓄和地下水资源开发利用与监督管理工作。

1.4 课题意义

北京是以地下水为主要供水水源的大城市之一,人均水资源占有量不足 400 立方米,相当于全国人均占有量的 $1/6$,世界人均占有量的 $1/25$ 。其不同年份的降水量为 64-131 亿立方米/年,可为北京提供地表水供水量 8-15 亿立方米/年;渗入地下后形成的地下水可采资源为 26.33 亿立方米/年。其中,地表水年际变化大,地下水具有良好的多年调节作用。平年时,地下水可开采水量占全市供水量的 $2/3$;枯水年,地下水的可采水量占全市供水量的 $3/4$ 强。从 20 世纪 70 年代大量开采地下水以来,每逢枯水年,地表水减少,都是靠超采地下水来满足北京市经济建设和社会发展的需要,据估计,北京地下水资源累积亏缺达到 40 亿立方米。尽管如此,在外调水源进京以前,地下水仍将在首都的持续发展起重要作用。即使南水北调进京后,地下水资源仍将发挥其不可替代的作用。

北京除了严重缺水问题,还有水质污染严重问题。据资料表明,北京每年排放的废水总量达到 9.7 亿立方米,其中工业废水 3.9 亿立方米,而全市污水集中处理率仅达 40%。大量未经处理的污水排入河道、渗井和坑道,加之农药和化肥的过量使用,许多地下水受到严重污染。目前污染最严重的是城近郊区,地下水总硬度超标率达 46.1%,超标面积为 273.3 平方公里。地下水硝酸盐氮的监测超标率为 22.2%,超标面积 136.3 平方公里。

永定河冲积洪积扇与潮白河冲洪积扇是本市两个主要的地下水供水水源地，北京城区的自来水水源地均集中在这两个冲洪积扇内。永定河冲积扇位于华北平原的西北缘，以石景山附近为顶点，向东南呈扇形展开，东西长 40km，南北宽 30km，面积近千平方公里。冲洪积扇含水层多由砂卵石、砂砾石、砂层组成，透水性好，渗透系数可达 300-500 立方/日。这一方面既有利于地下水补充，另一方面也极易使浅层地下水受到污染。因此，研究该地区地下水环境化学及其污染物形成对北京供水和地下水污染控制均有重要的社会和经济意义。

第二章 地下水随区域变化规律

2.1 地下水环境特征

永定河自三家店以下河道全长 200 公里左右,分为三家店-卢沟桥段、卢沟桥-梁(各庄)段,永定河泛区段和永定新河段等四段,冲积扇地下水主要为第四系松散沉积物孔隙水,含水层以砂卵砾石为主。昆明湖-复兴门-潘家园一线以西为潜水含水层,以东为承压含水层。研究区域位于三家店-卢沟桥段,属于永定河冲洪积扇顶部和中部地区。地下水采样分布如图 2.1 所示。根据不同区位和土地利用类型,地下水采样点可以分为:1、高井区:处于永定河冲积扇最顶部,包括五里坨、南宫村、涇峪村和麻峪村等,西北为农业区,分布一定面积农田,东南为工业企业区,主要有高井电厂和粉煤灰厂等;2、永定镇:主要为农业区,区间包括西辛村、东辛村、梁园村、增圣庄、坝房子、曹各庄和梁园村等,常年作物为小麦和玉米;3、石景山区:是北京重工业企业,分布有首钢、永定化工厂和水泥厂等大型企业,是首都重要污染源;4、衙门口区:是典型的污灌区,区间分布有较大面积的菜地,也是人口密集的居民区;5、张仪村和小瓦窑等地区:该地区主要以地下水灌溉为主的农业区;6、卢沟桥东包括五里店和宛平县城:主要为居民区,该地区水井密布,居民生活用水完全来自潜水;7、卢沟桥西(包括张郭庄和东河沿村等):为农业区。以下分别讨论地下水环境基本特征。表 2.1 是该研究区域采样点地下水的 PH 值、水温、溶解氧、电导率等的实验数据。

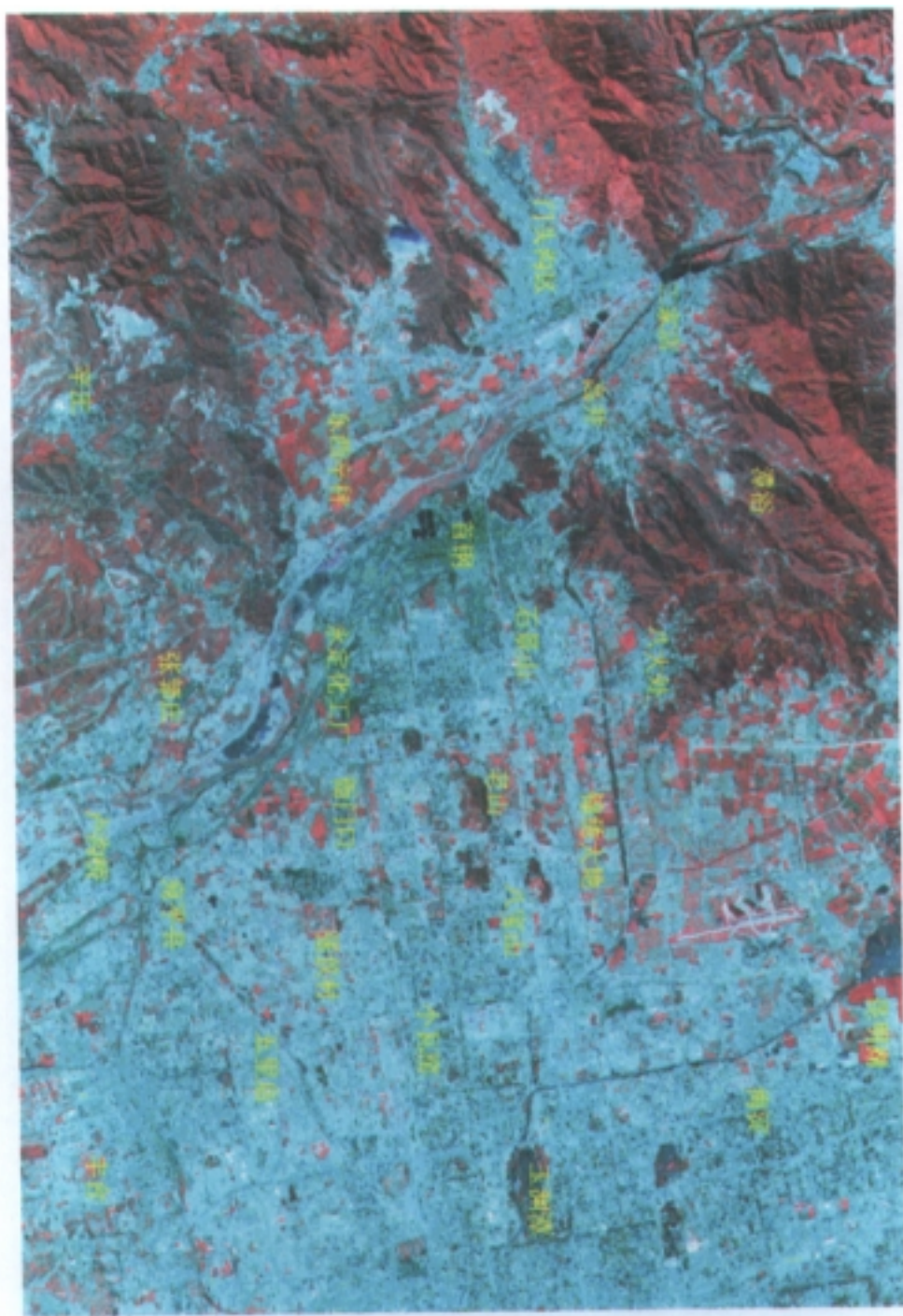


图 2.1 永定河冲洪积扇地下水研究区域
Figure 2.1 Yongdinghe alluvium research region

表 2.1 地下水环境特征水质指标
Table 2.1 The primary characteristic r of groundwater environment

采样地点	4 月 水温/℃	10 月 水温/℃	4 月 电导率/ Ω^{-1}	10 月 电导率/ Ω^{-1}	4 月 pH	10 月 pH
五里坨	15.5	17.1	776	896.0	8.04	8.24
煤校（浅）	15.6	17.4	687	392	7.94	8.30
折返段	11.3	16.7	972	975	7.66	7.96
粉煤灰厂	14.6	16.1	1048	1054	7.63	8.00
冯村	14.4	15.6	866	868	7.59	8.22
曹各庄	15.3	15.9	867	901	7.61	7.92
疗养院	15.4	15.7	958	926	7.56	8.30
栗园村	8.8	16.5	848	603	7.75	8.12
栗园村小学	13	16.8	820		7.76	
党校	9.3	15.6	846	868	7.92	8.20
西辛秤村	14.1	13.8	626	720	7.92	8.09
西辛秤（西）	14.5	15.1	859		7.89	
东辛秤	14.4	17.2	890	809	7.96	8.05
增圣庄	11.3	13.5	953	648	7.98	8.34
坝房子	15.7	15.6	850	863	8.00	8.26
上岸林	13.8	16.8	864	950	7.73	8.16
北辛安	12.3	15.1	612		7.32	
首钢东门	11.3	13.2	890		7.36	
水屯北	13.2	14.2	1050	1003	7.39	8.03
古城南路	11.3	12.4	1019	982	7.61	8.03
特钢	10.7	13.1	1048		7.49	
林业局家属院	12.1	15.2	1371	1413	7.34	8.21
金顶山	10.7	14.2	1101		7.36	
杏石口	12.1	16.1	1318	1340	7.19	7.83
锦绣大地果园南区	13.7	15.2	482		7.79	
锦绣大地北区	12.2	13.1	1072	1010	7.54	8.24
永定化工厂	13.8	15.2	1014		7.67	
燕山水泥厂宿舍	14.6	16.6	1230	674	7.44	8.22
燕山水泥厂	15.2	17.4	683		8.24	
养马厂	11.8		1003	675	7.59	8.23
永定河管理处	15		1000	1057	7.46	7.96
八宝山	18.8	18.7	1530	1592	7.62	7.81
八宝山鲁谷	15.7		897		7.66	
煤气储配厂	13.5		1405	313	7.50	8.16
衙门口	16.3		1697	1880	7.44	7.63
衙门口南	15.8		890	980	7.75	8.09
菜地	15.5	18.1	990	2060	7.77	7.66
景阳公司	15		1698		7.38	

衙门口西街	11.8		938	1058	7.55	8.19
桥果园	12		1450		7.54	
宛平县盲文印刷厂	13.8	16.5	1024	1069	7.90	8.20
卢沟桥西街东	13.5		1320	1316	7.67	7.73
卢沟桥西街	13.8	17.4	1585	1634	7.66	8.07
桥西佳加公司	14.5	16.5	1351	1239	7.49	7.69
卢沟桥大队（东关）	14.7	15.7	1086	303	7.82	8.20
五里店	13.6	17.6	1548	1396	7.70	7.98
五里店	11.9		1356		7.70	
郭庄子	15.5	15.1	1445	1360	7.44	7.98
大瓦窑（木材厂）	14.5	16.5	1033	1418	7.90	8.15
大瓦窑北	15.6	17.0	1455	1587	7.76	8.11
张仪村	11.6		1284		7.88	
张仪村西大棚	15.6	16.6	1286	1477	7.74	7.91
张仪村西果园	15.2		908		8.07	
张仪村南果园	17.1		946	1342	7.95	8.07
张仪村金达储运公司	14.4		1282		7.89	
张仪村北屠宰场	15.7		1251		7.79	
张仪村村部	12		1081		7.92	
西南坟	11.8		1298	1245	7.60	7.95
西南坟菜地	11.1		1303		7.58	
四顷地	15.5		1343		7.59	
梅市口	13.7		1354	1329	7.64	8.21
小瓦窑	12		1135		7.64	
吴家村	14.7	17.2	1255	1203	7.66	7.75
三顷地	16.4		1267	299	7.76	8.13
成庙庄	13.7		1644		7.74	
张郭庄（一队）	15	14.7	1222	1322	7.49	7.79
张郭庄（二队）	13.5	14.6	1145	1224	7.53	8.10
张郭庄（三队）	16	16.4	1120	1051	7.61	8.10
东河沿	11.2		1232		7.46	
东河沿菜地	16.8	16.5	987	1171	7.79	7.93
东河沿采砂厂老井	14.8	15.4	1045	1105	7.68	7.93
采砂厂新井水	15.2		989	1068		8.05
东河沿村	13.7	14.1	1078		7.71	

2.1.1 地下水埋深

2001 年 4 月份永定河冲洪积扇三家店-卢沟桥段地下水埋深调查结果如图 2.2 所示，调查结果表明，地下水位与潜伏地表基本一致，随着地势由上游向下游逐渐加深，并以永定河为界，随着离岸距离增加地下水位逐渐加深，区域平均

地下水埋深大于 20 米。由于八宝山岩基隆起，永定河冲洪积扇地下水在老山西缘被分为两条支流，一支经杨庄流向黄庄洼地；另一支流则向东南流向丰台。由于过度超采地下水，分别在永定镇和卢沟桥附近形成两个地下水漏斗区，平均水位分别为 46.8 米和 34.2 米。

地下水埋深

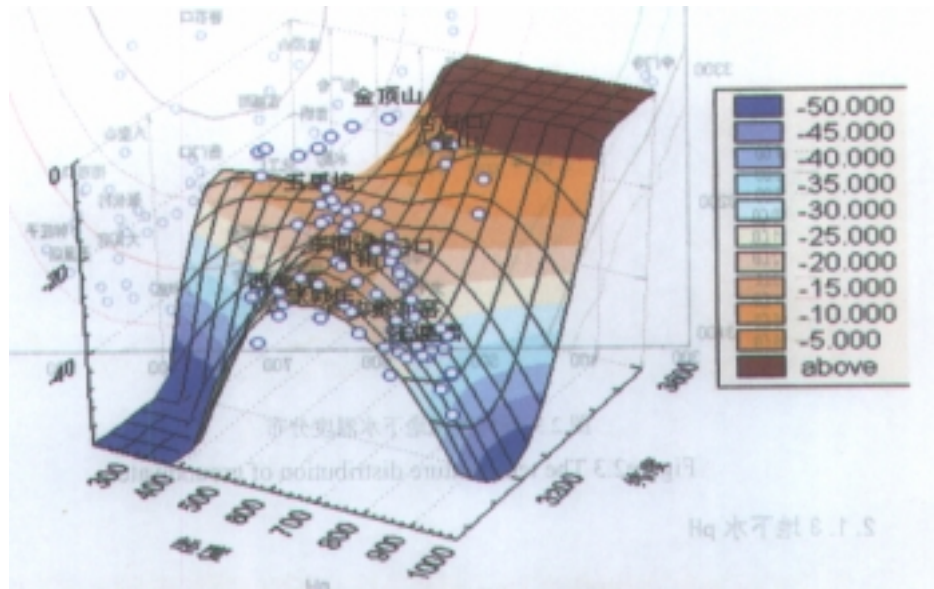
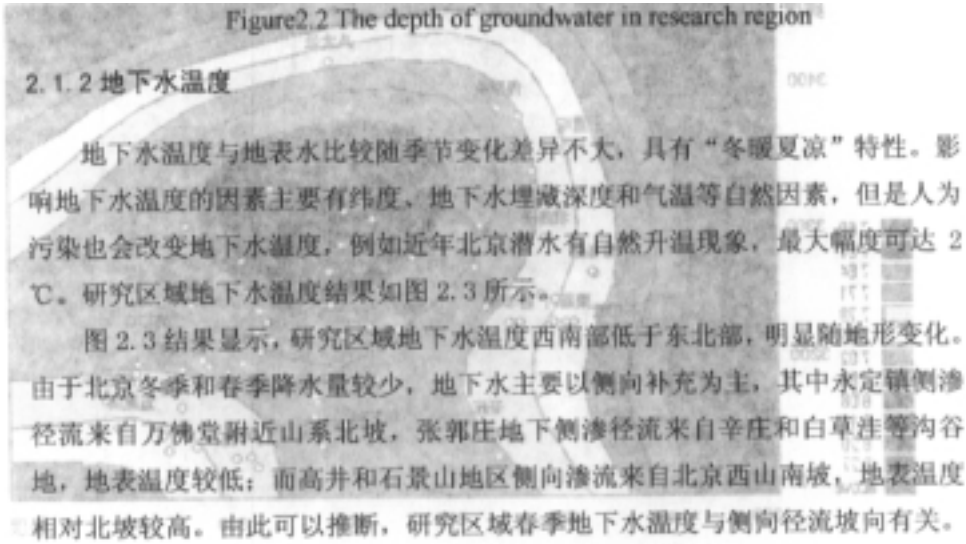


图 2.2 研究区域地下水埋深



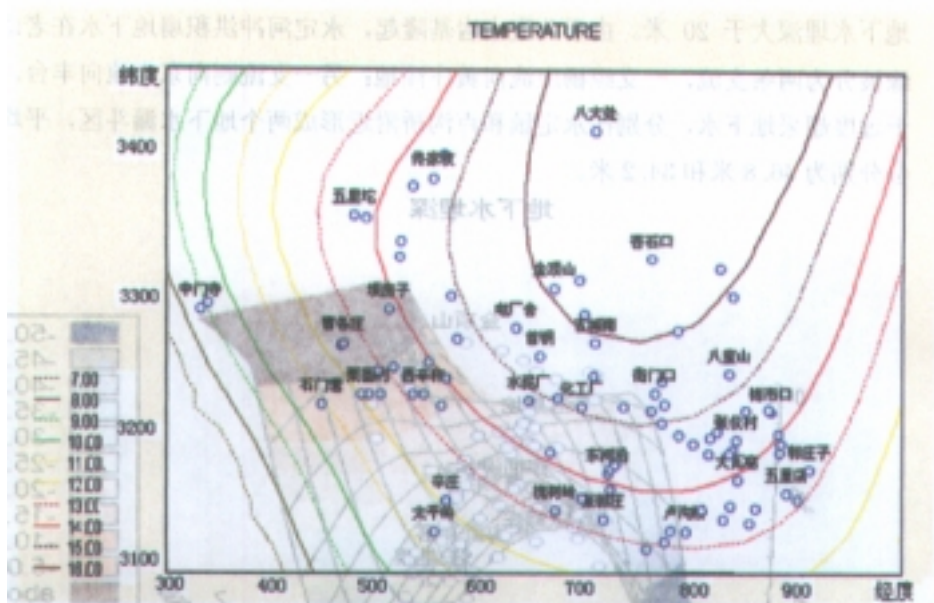


图 2.3 研究区域地下水温度分布

Figure 2.3 The temperature distribution of groundwater

2.1.3 地下水 pH

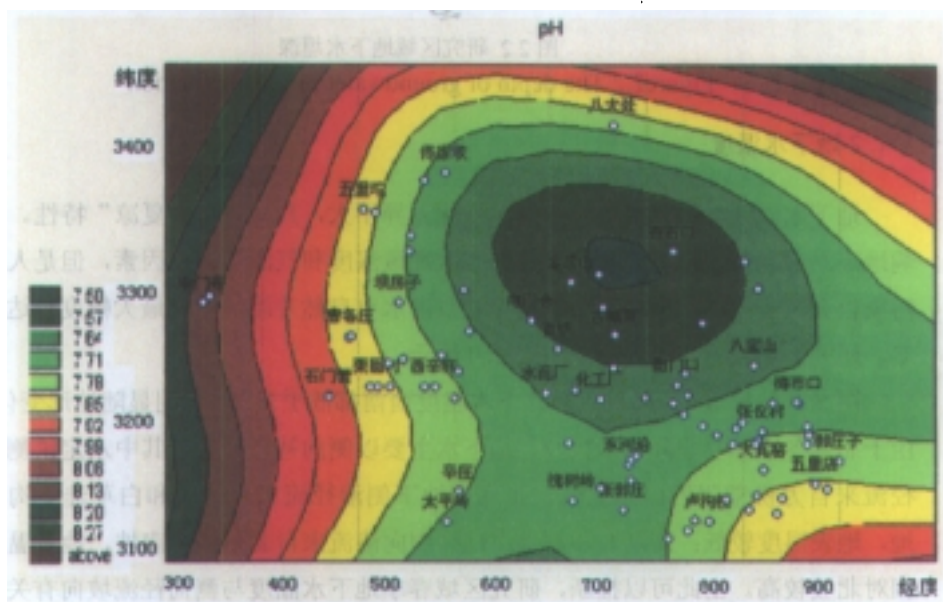


图 2.4 研究区域地下水 pH 值分布

Figure 2.4 The pH value of groundwater

地下水 pH 具有地带异特性, 一般北方地下水 pH 大于 7.5, 而南方地下水 pH 小于 7.0。这与土壤地带分异有关。研究区域春季地下水 pH 调查结果如图 2.4。

图 2.4 结果显示, 研究区域春季地下水 pH 变化在 7.2—8.2 之间, 大部分采样点 pH 落在 7.7—7.8 之间, 平均 pH 为 7.7。不同区域 pH 变化有较大差异, 在首钢以北的金顶山附近形成一个低 pH 晕圈, 包括古城南路, 苹果园和杨庄等地区。晕圈最低 pH 平均为 7.19, 最高 pH 为 7.40, 低于研究区域 pH 平均值, 这种差异可能与该地区工业污染有关。

2.1.4 电导率

研究区域春季地下水电导率变化结果如图 2.5 所示。调查结果表明, 永定河冲洪积扇地下水电导率随地下径流方向有逐渐升高趋势, 永定河上游电导率高于下游, 坡地电导率高于谷地, 距离河床越近, 电导率也越高。总体上, 地下水电导率随着地下水径流方向逐渐升高。显然, 这与地下水在流经含水层时溶解矿物有关。随着径流长度加长, 地下水溶解固体含量增加, 电导率随之升高。

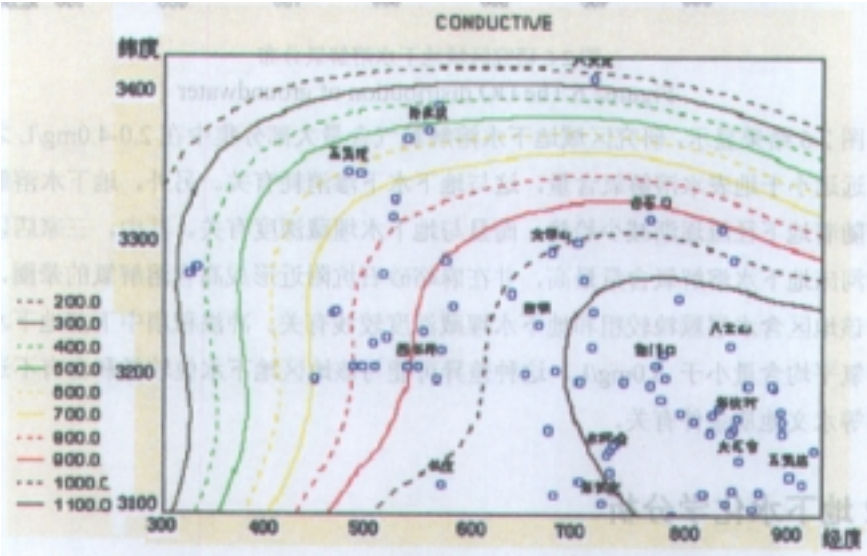


图 2.5 研究区域地下水电导率分布
Figure2.5 The conductivity distribution of groundwater

2.1.5 溶解氧

溶解氧是表征水环境的重要指标。地下水溶解氧大部分在下渗过程中与有机质或其他还原物质反应消耗了大部分, 一般都比地表水含氧量低。但是在冲洪积扇砂卵石、砂砾石和砂层含水岩组中, 由于下渗速率极快, 地下水往往还赋存一定量的溶解氧。但是, 有机质含量高的地区, 或地下水污染较严重的地区溶解氧相对较低。研究区域春季地下水溶解氧调查结果如图 2.6 所示。

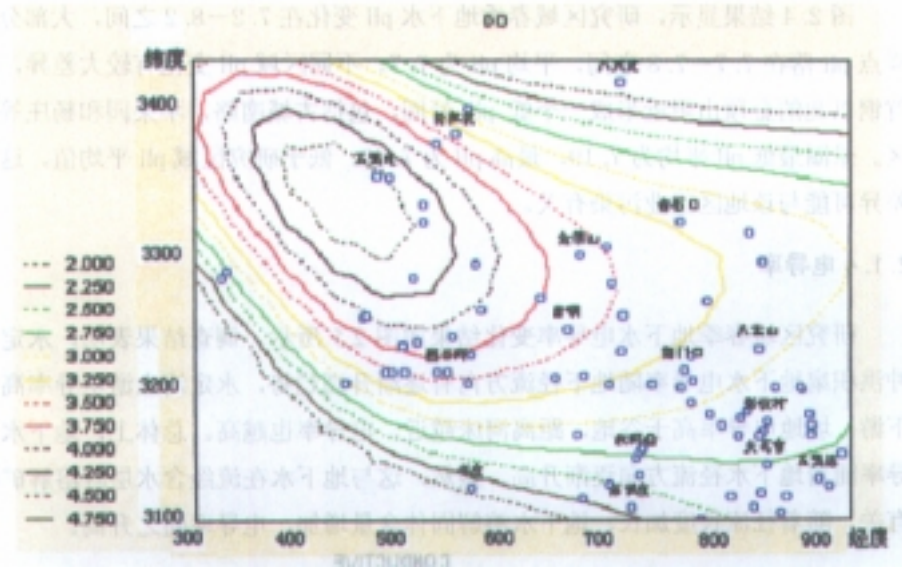


图 2.6 研究区域地下水溶解氧分布
Figure2.6 The DO distribution of groundwater

图 2.6 结果显示，研究区域地下水溶解氧气含量大部分集中在 2.0-4.0mg/L 之间，远远小于地表水溶解氧含量，这与地下水下渗消耗有关。另外，地下水溶解氧有随着地下径流逐渐减少趋势，而且与地下水埋藏深度有关。其中，三家店以下的河床地下水溶解氧含量最高，并在麻峪砂石坑附近形成高含溶解氧的晕圈，这与该地区含水层颗粒较粗和地下水埋藏深度较浅有关。冲洪积扇中下部地下水溶解氧平均含量小于 3.0mg/L，这种差异可能与该地区地下水位较低和含有不透水层等水文地质条件有关。

2.2 地下水化学分析

2.2.1 地下水主要化学成分

地下水中分布最广、含量最多的离子有七种，即：氯离子 (Cl^-)、硫酸根离子 (SO_4^{2-})、重碳酸根离子 (HCO_3^-)、钠离子 (Na^+)、钾离子 (K^+)、钙离子 (Ca^{2+}) 及镁离子 (Mg^{2+})。构成这些离子的元素，或是地壳中含量最高，而且容易溶解于水的（如 O_2 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ ），或是地壳中含量虽然不大，但极其容易溶解于水的 (Cl 和以 SO_4^{2-} 形式出现的 S)。Si、Al、Fe 等元素，虽然在地壳中含量很大，但由于其很难溶于水，地下水中含量一般含量不大。

一般情况下，随着总溶解固体的变化，地下水中占主要地位的离子成分也随

着发生变化。低矿化度水中常以 HCO_3^- 及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主；高矿化度水则以 Cl^- 及 Na^+ 为主；中等矿化度的地下水中，阴离子常以 SO_4^{2-} 为主，主要阳离子则可以是 Na^+ ，也可以是 Ca^{2+} 。

地下水的矿化度与离子成分间之所以往往具有这种对应关系，一个主要原因是水中盐类的溶解度不同。总的来说，氯盐的溶解度最大，硫酸盐次之，碳酸盐较小。钙的硫酸盐，特别是钙、镁的碳酸盐溶解度最小。随着矿化度的增加，钙镁的碳酸盐首先达到饱和并沉淀析出，继续增加时，钙的硫酸盐也饱和析出。因此，高矿化度水中便以易溶解的氯和钠占优势了。研究区域春季浅层地下水主要离子含量调查结果如下表。

表 2.2 研究区域春季浅层地下水主要指标分析结果

Table 2.2 The main analyse results of shallow groundwater in spring

分析项目	样本量	均值 /mg/L	极小值 /mg/L	极大值 /mg/L	标准差	样本分布 偏度系数	样本分布 峰态系数
Ca^{2+}	84	80.3	31.4	156.7	22.4	0.41	0.72
Mg^{2+}	84	34.3	6.0	58.6	11.8	-0.47	0.03
K^{2+}	84	7.1	0.00	18.4	3.8	0.37	-0.35
Na^+	84	79.5	10.4	152.3	34.9	-0.24	-0.65
HCO_3^-	84	306.1	136.8	451.1	69.0	-0.42	-0.05
SO_4^{2-}	84	119.6	11.2	322.6	47.1	0.37	3.58
Cl^-	84	107.3	3.0	301.9	60.3	0.78	1.13
NO_3^--N	84	10.9	0.00	32.3	6.5	1.07	1.90
NH_4^+-N	85	0.18	0.01	0.51	0.11	0.65	0.15
F^-	84	0.51	0.00	1.39	0.25	1.31	3.40
Ba^{2+}	87	0.16	0.01	0.67	0.09	1.76	8.09
Sr	87	0.60	0.12	5.49	0.63	6.15	44.59
溶解性 SiO_2	85	15.6	2.3	23.0	3.6	-1.12	2.43
硬度	87	331.7	0.00	594.2	112.7	-0.77	1.42
碱度	87	242.3	0.00	369.8	72.2	-1.33	2.72
盐度	87	757.2	174.2	1009.5	188.7	-0.44	-0.19
总溶解固体	87	592.4	88.0	833.0	163.2	-0.31	-0.22
总有机碳	43	0.52	0.14	2.36	0.34	4.00	21.22

表 2.2 分析结果表明, 永定河冲洪积扇地下水总溶解固体含量平均 592.4mg/L, 变化范围在 88.0-833.0mg/L 之间, 标准差达 163.2, 说明不同采样点总溶解固体含量差异很大, 总体分布呈左偏低峰态, 说明不同区位总溶解固体含量存在明显差异。事实上, 总溶解固体含量是随着径流参数变化的。

就组成总溶解固体的主要离子含量而言, 阴离子以 HCO_3^- 为主, SO_4^{2-} 其次, Cl^- 含量略低于 SO_4^{2-} , NO_3^- 含量平均为 10.9mg/L, 含量虽然不高, 但是其对水质影响很大, 因此水质标准规定不超过 10.0mg/L, 因此, 研究区域地下水 NO_3^- 含量明显超标, 有的高达 32.0mg/L 以上。阳离子含量以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 平均含量分别为 80.3mg/L 和 79.5mg/L, 其次是 Mg^{2+} , 平均含量 34.3mg/L, K^+ 含量最少。除了主要离子外, 地下水中还含有一定量的溶解性二氧化硅, 平均含量 15.6mg/L, Sr 、 Ba^{2+} 、 F 和氨氮平均含量分别为 0.6、0.16、0.51 和 0.18mg/L, 远远低于主要离子含量。

就不同指标的标准差计算结果来看, 不同采样点之间调查结果存在很大差异。这些采样指标观测值分布除了 Sr 和 TOC 外, 均呈低峰态分布。说明, 以上观测指标存在明显的空间异质性。以下分别讨论不同指标的空间分布。

2.2.2 区域变化

2.2.2.1 地下水总溶解固体区域变化

地下水中所含各种离子、分子与化合物的总量称为总溶解固体 (TDS, 也称矿化度), 以每升所含克数 (g/L) 表示。为了便于比较不同地下水的矿化度, 习惯上以 105℃-110℃时将水蒸干所得的干涸残余物总量来表征总矿化度。研究区域地下水总溶解固体空间分布如图 2.7 所示。图 2.7 结果显示, 研究区域春季地下水总溶解固体含量明显受地形和地下径流影响。其中高地 TDS 含量低于低地和洼地, 例如, 同一纬度的中门寺和坝房子, 中门寺 TDS 含量较后者低 200mg/L 以上, 同一经度上, 八大处 TDS 含量较金顶山也低于 200mg/L 以上。这是因为地下水不能在地高滞留, 而洼地地下水不仅受淋滤溶解作用的影响, 还受潜水层蒸发浓缩作用的影响, 因此一般洼地的 TDS 含量较高。同时, 地下水 TDS 还受地下径流补给的影响, 图 2.7 可以明显看出地下径流由于受八宝山基岩隆起影响在衙门口附近分成两条支流, 其一流向黄庄洼地, 另一支流向卢沟桥。两条支流 TDS 含量比较一致, 大约在 500-600mg/L 之间。

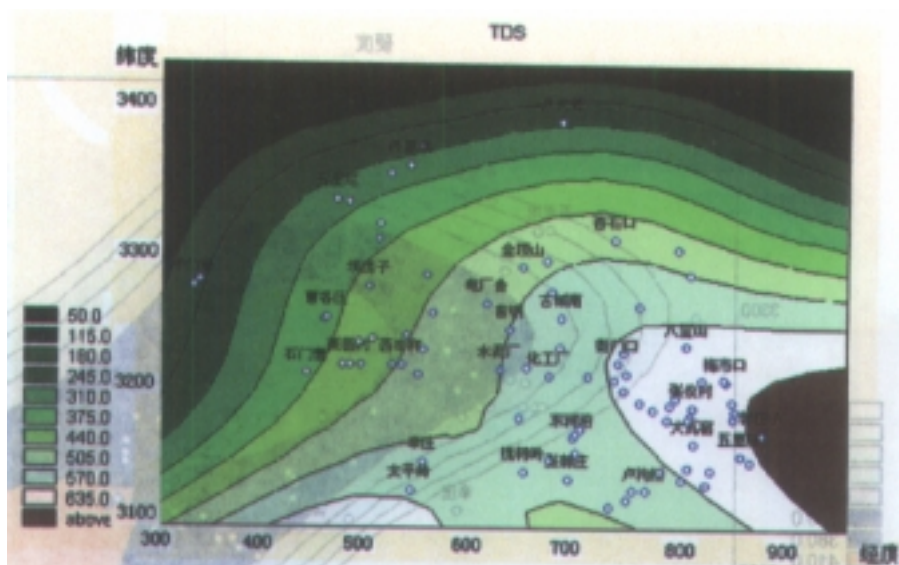


图 2.7 研究区域地下水总溶解固体分布

Figure 2.7 The TDS distribution of groundwater

另外,图 2.7 还显示,处于两条地下水径流之间的衙门口-张仪村-大瓦窑 TDS 含量相对较高,受低矿化水稀释影响,其分布规律与地下径流方向基本一致。衙门口-张仪村-大瓦窑地区大面积分布农田和菜地,因此地下水 TDS 含量相对较高可能与灌溉淋溶有关,同时污水灌溉和施肥也带入比较多的溶解性物质。

2.2.2.2 硬度

高硬度水与肥皂反应产生沉淀而影响洗涤效果，在锅炉和输水管道中产生水垢而影响其使用寿命。近年来，人们还发现饮用水硬度过高会增加心血管发病率。因此，硬度是一个很有用的水质指标。研究区域春季地下水硬度分布如图 2.8 所示。图 2.8 结果显示，研究区域春季地下水硬度分布出现两个高硬度分布中心。其一在衙门口附近，以古城为中心，区域包括首钢、北辛安、杨庄、衙门口北、苹果园和八宝山等地。另一个分布中心在五里店以南丰台地区。这两个高硬度中心的形成可能与总溶解固体含量较高有关，采样点多集中在高硬度中心以外的区域，多数采样点硬度含量在 400mg/L - 300mg/L 之间，属于硬水。这对当地工业和居民生活有一定的影响，采样过程采访当地居民都有比较一致的看法：水碱多，而且在高硬度区内，如五里店和卢沟桥等地有较多结石病，而且癌症发病率也相对城区高。总体上，地下水永定河河床以东地下水硬度高于河床，可能与地下水径流方向自出东西辛秤以后向东和向南流动有关，另外，两个地下水高硬度分布中心分别处于八宝山基岩隆起南北两侧，说明八宝山基岩隆起对地下水硬度分布也有影响。

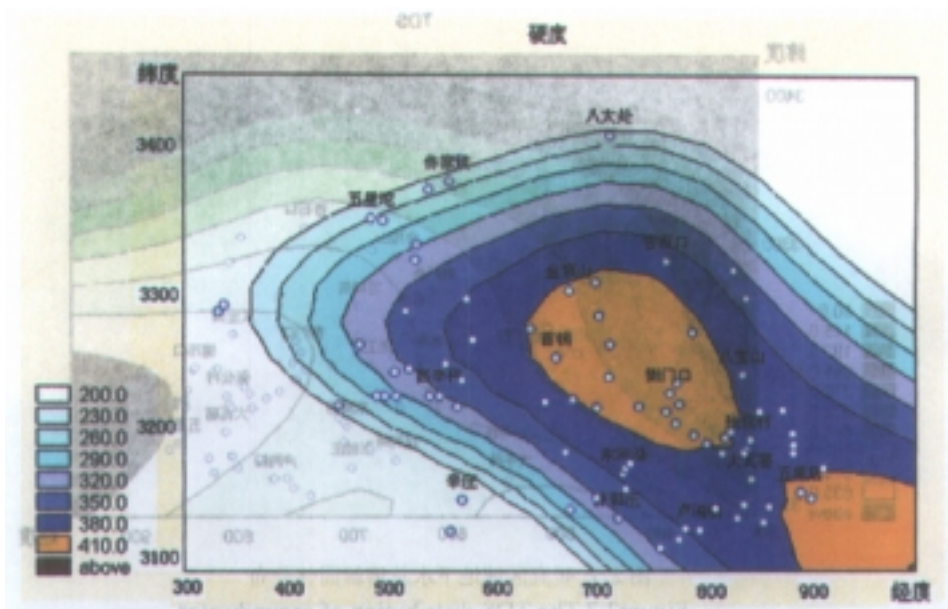


图 2.8 研究区域地下水硬度分布

Figure 2.8 The hardness distribution of groundwater

2.2.2.3 碱度

碱度是标准地下水系统酸碱平衡特征的指标, 主要取决于地下水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的含量。研究区域春季地下水碱度分布如图 2.9 所示。

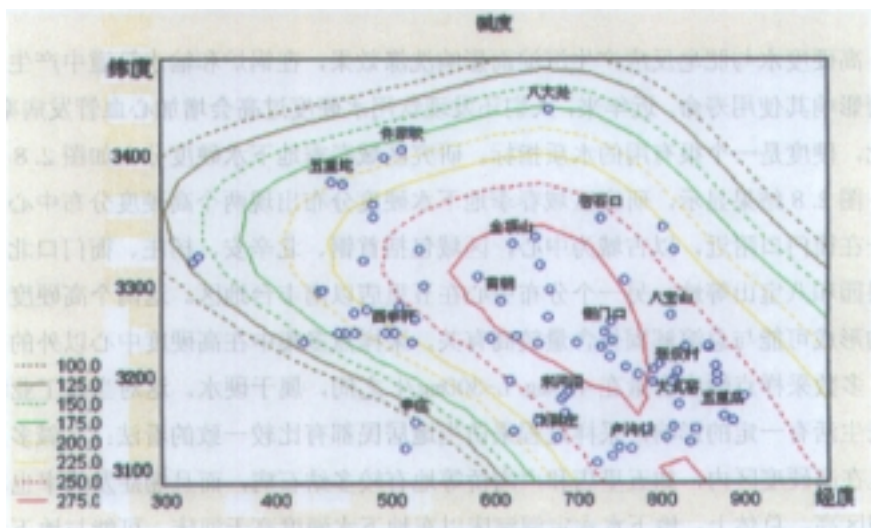


图 2.9 研究区域地下水碱度分布

Figure 2.9 The alkalinity distribution of groundwater

图 2.9 显示,地下水碱度分布与硬度分布有很大的相似性,都在永定河河床

以东地区形成两个高碱度中心，可能还与地下水埋藏深度有关，即随着地下水埋藏深度加大，碱度和硬度相应也增加。这种变化可能与地下水下渗淋溶石灰岩有关。

2.2.2.4 钙离子 (Ca^{2+})

钙是低矿化度水中的主要阳离子，其含量一般不超过数百毫克/升。在高矿化度水中，由于阴离子主要是 Cl^- ，而 CaCl_2 的溶解度相当大，故 Ca^{2+} 的绝对含量显著增大，但通常仍然小于 Na^+ 。矿化度格外高的水，钙也可以成为主要离子。地下水中的 Ca^{2+} 来源于碳酸盐类沉积及含石膏沉积物的溶解，以及岩浆岩、变质岩中含钙矿物的风化溶解。研究区域春季地下水钙离子含量分布如图 2.10 所示。

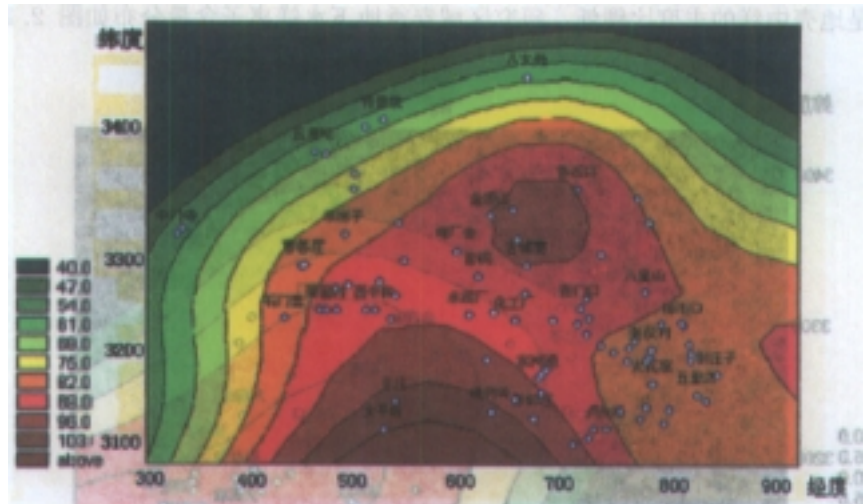
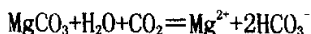


图 2.10 结果显示，研究区域钙离子含量一般小于 100mg/L ，多数采样点钙离子含量变化在 $80\text{--}90\text{mg/L}$ 之间，基本属于低矿化度地下水类型，这是因为研究区域位于永定河冲洪积扇顶部。近年来由于三家店水库蓄水，地表水对地下水的补给很少，地下水主要补给主要来自大气降水，而大气降水是矿化度很低的软水，地下水钙离子含量主要来自地下水或灌溉用水下渗溶解所引起的，不同区域钙离子含量变化与区域水文地质条件差异有关。例如，同样是山前地下水，八大处-佟家坟-五里店和中门寺一带地下水总钙含量不足 50mg/L ，但是南面辛庄和太平岭山前地下水的钙离子含量远远高于其他地区，这种差异可能与永定河两岸地质条件差异有关。根据 1973-1975 年北京西郊环境水文地质调查图可以看出：香山-石景山一带含水岩组主要由富水性弱到中等的碎屑岩组成；而南面潭柘寺-大灰

厂一带广泛分布有富水性强的碳酸盐岩。由此可以推断,南面山区地表水补给地下水含有较多钙离子,从而增加该地区地下水钙离子含量。至于金顶山区附近形成钙离子含量相对较高的分布中心可能与前面讨论过的低 pH 晕圈有关。

2.2.2.5 镁离子 (Mg^{2+})

镁的来源及其在地下水中的分布与钙相似。来源于含镁的碳酸盐类沉积岩（如白云岩、泥灰岩等），此外，还来自岩浆岩、变质岩中含镁矿物的风化溶解，如： $(\text{Mg}, \text{Fe}) 2\text{SiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 = \text{MgCO}_3 + \text{FeCO}_3 + \text{Si}(\text{OH})_4$



Mg^{2+} 在低矿化度水中的含量通常较 Ca^{2+} 少,一般不成为地下水中的主要离子,部分原因是地壳中镁的丰度比钙低。研究区域春季地下水镁离子含量分布如图 2.11 所示。

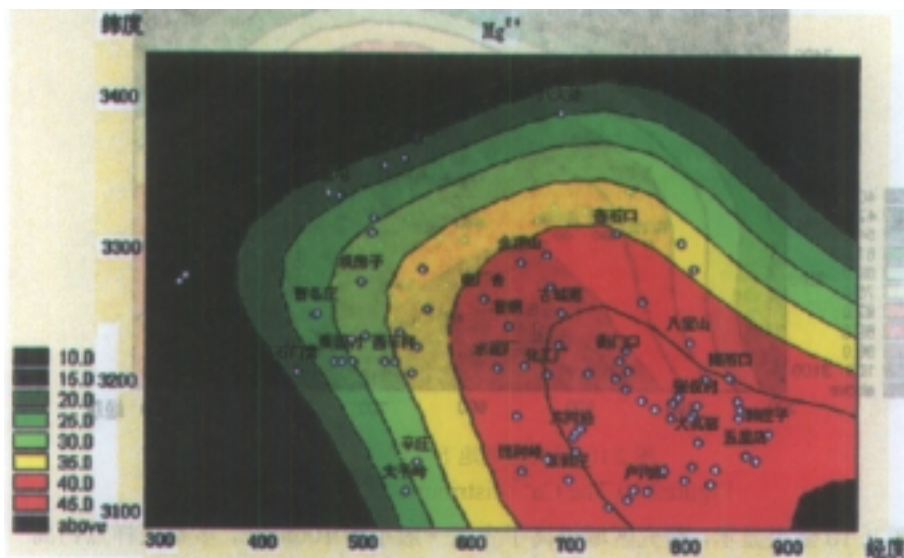


图 2.11 研究区域地下水镁离子分布

Figure 2.11 The Mg^{2+} distribution of groundwater

图 2.11 结果显示, 研究区域春季地下水 Mg^{2+} 含量一般小于 $50mg/L$, 大部分采样点 Mg^{2+} 含量在 $30-45mg/L$ 之间。地下水 Mg^{2+} 含量变化随地下水径流方向逐渐增加, 这与总溶解固体含量变化方向基本一致。事实上, Mg^{2+} 含量增加是地下水由低矿化度向高矿化度转变的一个重要特征, 这种变化与地下水径流长度增加而增加矿物溶解和接受更多可溶解固体等因素有关。

2.2.2.6 钠离子 (Na^+)

钠离子在低矿化度水中的含量一般很低,仅数毫克/升至数十毫克/升,但在

高矿化度水中则是主要阳离子，其含量可以高达数十克/升。钠离子来自沉积岩中岩盐及其他钠盐的溶解，在岩浆岩和变质岩地区，则来自含钠矿物的风化溶解。酸性岩浆岩中有大量含钠矿物，如钠长石；因此，在 CO_2 和 H_2O 的参与下，将形成低矿化度的以 Na^+ 及 HCO_3^- 为主的地下水。由于 Na_2CO_3 的溶解度比较大，故当阳离子以 Na^+ 为主时，地下水 HCO_3^- 的含量可以超过与 Ca^{2+} 伴生时的上限。研究区域春季地下水钠离子含量分布如图 2.12 所示。

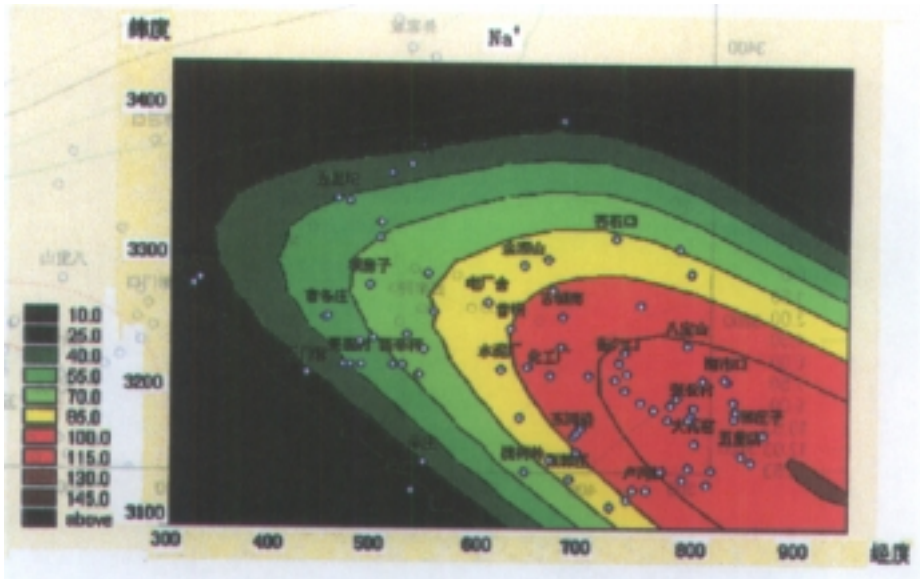


图 2.12 研究区域春季地下水钠离子分布

Figure 2.12 The Na^+ distribution of groundwater

图 2.12 结果显示, 研究区域春季地下水钠离子含量也随着地下水径流方向逐渐增加。整个区域地下水钠离子含量变化范围在 10-120mg/L 之间, 变化幅度极大。其中山前地下水钠离子含量最低, 如中门寺-石门营-太平岭和五里坨-佟家坟-八大处一带, 地下水钠离子平均含量小于 25mg/L, 而卢沟桥附近, 如五里店-郭庄子-大瓦窑钠离子平均含量超过 120mg/L; 另外, 永定镇地下水钠离子含量也明显低于同处一个纬度的石景山区。这种变化可能人类活动影响有关, 其中不仅包括农业灌溉、施肥和居民生活污水排放, 可能还与工业污染有关。

2.2.2.7 钾离子 (K^+)

钾离子的来源以及在地下水中的分布特点与钠相似。它来自含钾盐类沉积岩的溶解, 以及岩浆岩、变质岩中含钾矿物的风化溶解。在低矿化度地下水中含量

甚微，而在高矿化度水中较多。虽然在地壳中钾的含量与钠相近，钾盐的溶解度也相当大。但是，在地下水中 K^+ 的含量要比 Na^+ 少得多；这是因为 K^+ 大量参与形成不溶于水的次生矿物（如水云母、蒙脱石、高岭土等），并极易为植物所摄取。研究区域春季地下水钾离子含量分布如图 2.13 所示。

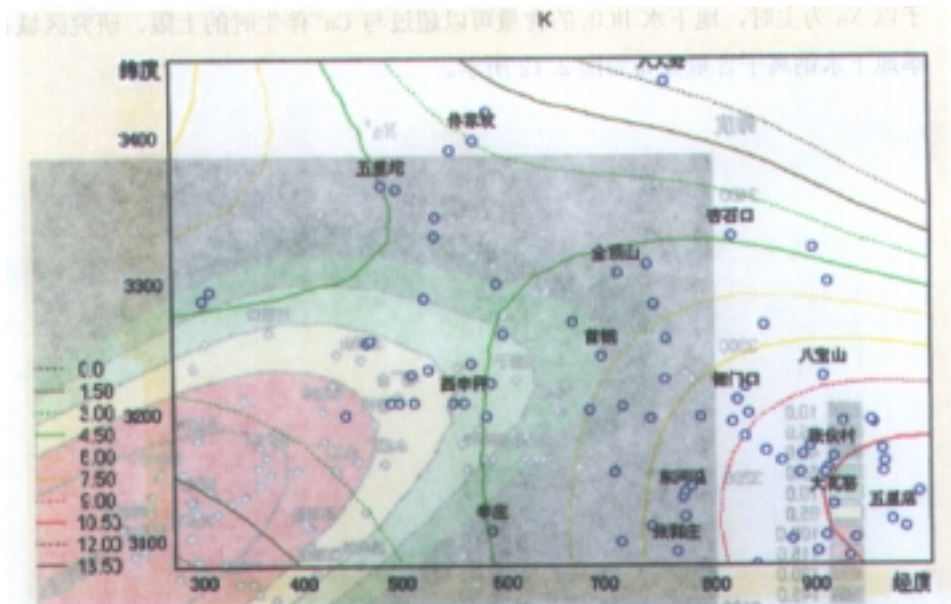


图 2.13 研究区域春季地下水 K^+ 含量分布

Figure 2.13 The K^+ distribution of groundwater

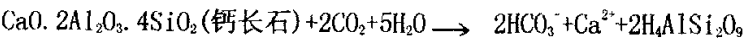
图 2.13 结果显示，研究区域春季地下水 K^+ 含量一般小于 12mg/L，远小于 Na^+ 含量。就其空间分布而言，冲积扇顶部 K^+ 含量小于中下部，随着地下水径流方向逐渐增加，这与 Mg^{2+} 和 Na^+ 分布比较相似。

2.2.2.8 重碳酸根离子 (HCO_3^-)

地下水中的重碳酸根离子有几个来源。首先来自含碳酸盐的沉积岩与变质岩（如大理石）的水解，如： $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow 2 HCO_3^- + Ca^{2+}$ 或 $MgCO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow 2 HCO_3^- + Mg^{2+}$ 。

$CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 是难溶解于水的，当水中有 CO_2 存在时，方有一定的溶解度，水中 HCO_3^- 的含量取决于 CO_2 含量的平衡关系。

岩浆岩与变质岩地区， HCO_3^- 主要来自铝硅酸盐矿物的风化溶解，如： $NaAlSi_3O_8$ (钠长石) + $2CO_2 + 3H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + 2Na^+ + H_4AlSi_2O_9 + 4SiO_2$



地下水中 HCO_3^- 的含量一般不超过数百毫克/升, HCO_3^- 几乎总是低矿化度地下水的主要阴离子成分。研究区域地下水 HCO_3^- 含量空间分布如图 2.14 所示。

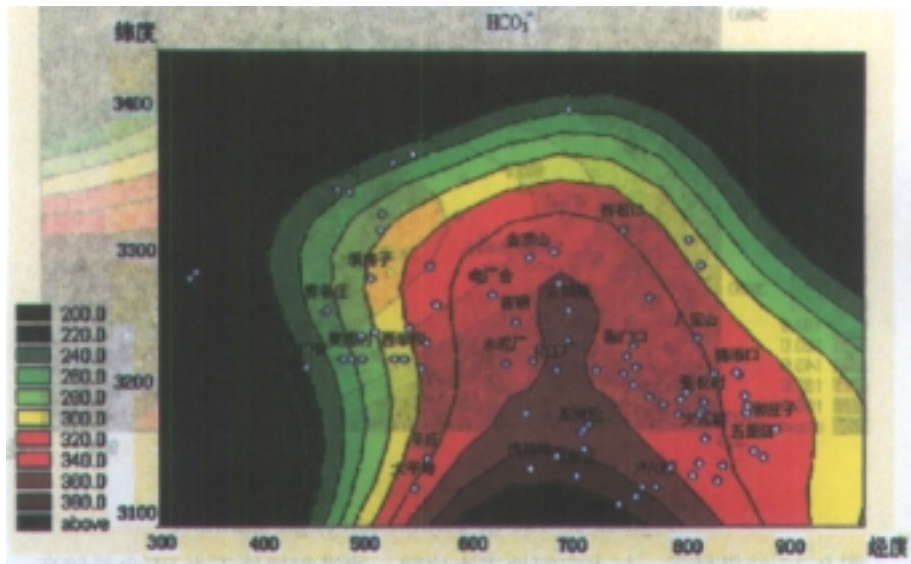


图 2.14 研究区域地下水 HCO_3^- 含量分布
Figure 2.14 The HCO_3^- distribution of groundwater

图 2.14 结果显示, 研究区域地下水 HCO_3^- 分布与 Ca^{2+} 分布比较相似, 由此可以推断该地区地下水接受潭柘寺-大灰厂碳酸岩地区的岩溶地下水补给, 补给地下水露头可能在张郭庄和槐树岭一带。由于碳酸岩岩溶地区地下水含有较高浓度的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 从而影响补给区潜水的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 含量。

2.2.2.9 氯离子 (Cl^-)

氯离子在地下水中广泛分布, 但在低矿化度水中一般含量仅数毫克/升, 到数十毫克/升, 高矿化度水中可达数克/升乃至 100 克/升以上。地下水中的 Cl^- 主要有以下几种来源: (1) 来自沉积岩中所含岩盐或其他氯化物的溶解; (2) 来自岩浆岩中含氯矿物[氯磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 、方钠石 $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot \text{NaCl}$]的风化溶解; (3) 来自海水: 海水补给地下水, 或者来自海面的风将细沫状的海水带到陆地, 使地下水中 Cl^- 增加; (4) 来自火山喷出物的溶滤; (5) 人为污染: 工业、生活污水及粪便中含有大量 Cl^- , 因此, 居民点附近矿化度不高的地下水中, 如果发现 Cl^- 的含量超过统计值, 则说明很可能已经受到污染。另外, 氯离子不被植物及微生物所摄取, 也不被土壤颗粒表面吸附, 而氯盐溶解度大, 不容易沉淀析出, 是地下水中最稳定的离子。它的含量随着矿化度增加而不断地增加, Cl^- 的含量常

可以用来说明地下水的矿化度程度。研究区域地下水氯离子分布如图 2.15 所示。

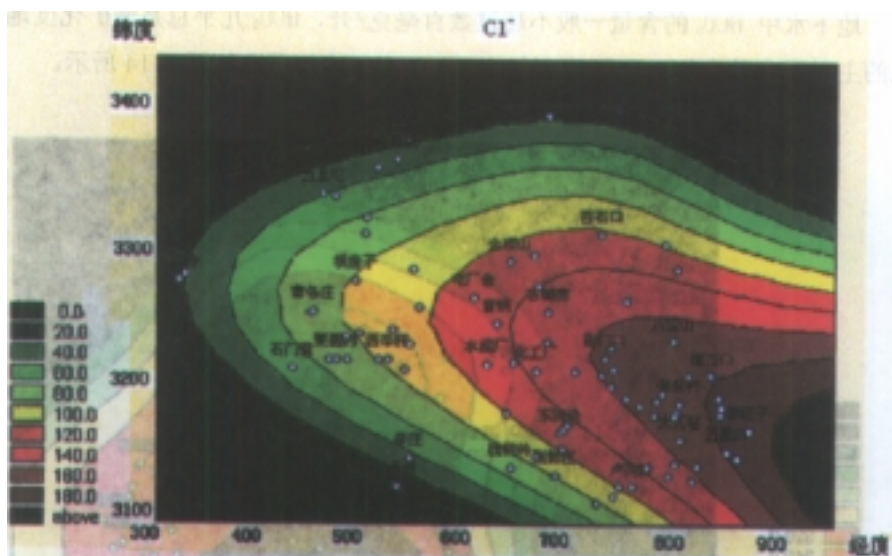


图 2.15 结果显示，与永定河地表水比较，冲洪积扇地下水 Cl^- 含量较高，大部分采样地下水 Cl^- 含量均超过 100mg/L ，是地表水（如三家店） Cl^- 含量的 2 至 3 倍。不同区位的地下水 Cl^- 含量也有比较明显的差异，其中山前地下水含量远小于平原区，冲积扇顶部地下水 Cl^- 含量也低于中下部。总体上，地下水的 Cl^- 分布与 Na^+ 和 Mg^{2+} 分布相似，即地下水 Cl^- 含量随着地下水径流逐渐增加，这种变化与地下水矿化度增加显著正相关。

2.2.2.10 硫酸根离子 (SO_4^{2-})

在高矿化度地下水中，硫酸根离子仅次于氯离子，可达数克/升，个别地下水达数十克/升；在低矿化度地下水中，一般含量仅为数毫克/升至数百毫克/升；中等矿化度的水中，硫酸根离子常成为最多的阴离子。

地下水中的硫酸根离子来自含石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 或其他沉积岩的硫酸盐矿物的溶解。硫化物的氧化则使本来难溶解于水中的 S 以 SO_4^{2-} 形式进入地下水中。化石燃料的燃烧给大气提供了认为作用产生的 SO_2 与氮氧化物(每年 2-2.5 亿吨)，氧化并吸收水分后构成富含硫酸及硝酸的降水——“酸雨”，从而使地下水中 SO_4^{2-} 增加。目前我国每年向大气排放 SO_2 已经达到 1800 万吨（何妙福等，1991），因此，地下水中 SO_4^{2-} 的这一来源已经不容忽视。由于 CaSO_4 的溶解度较小，限制了 SO_4^{2-} 在水中的含量，所以，地下水中的 SO_4^{2-} 远不如 Cl^- 来得稳定，最高含量也远低于

于 Cl^- 。研究区域春季地下水 SO_4^{2-} 分布如图 2.16 所示。

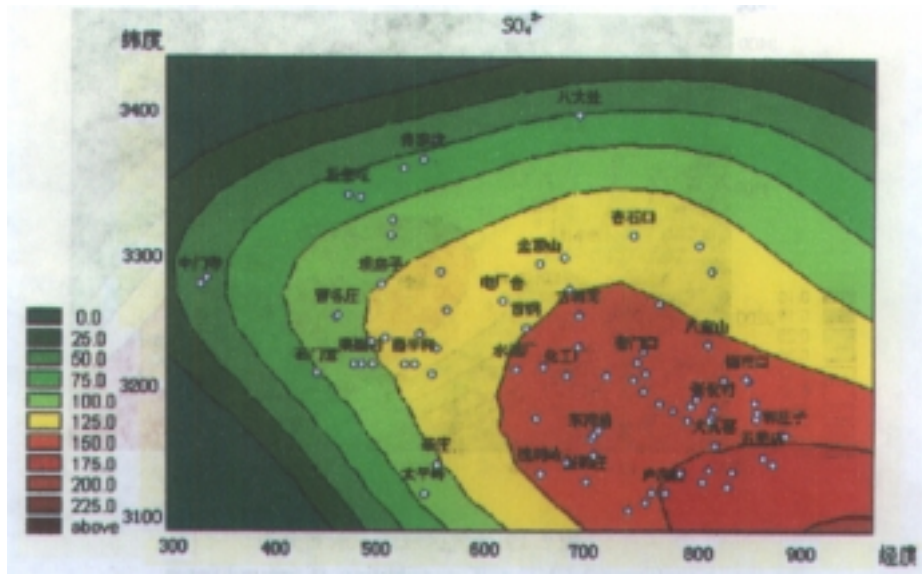


图 2.16 研究区域地下水 SO_4^{2-} 含量分布
Figure2.16 The SO_4^{2-} distribution of groundwater

图 2.16 结果显示，研究区域地下水 SO_4^{2-} 含量一般小于 200mg/L，大部分采样点地下水 SO_4^{2-} 含量在 100-175mg/L 范围之间。就区域变化而言，地下水 SO_4^{2-} 分布与 Mg^{2+} 分布比较一致。即冲积扇顶部 SO_4^{2-} 含量低于中下部，随着地下水矿化度升高而增加。

2.2.2.11 氟化物 (F^-)

天然水体一般都含有氟化物，但是饮用水对氟化物的浓度有一定的要求，我国规定为 1.0mg/L，欧共体规定饮用水水源的地表水标准为 0.7-1.0mg/L。研究区域 F 分布如图 2.19 所示。

图 2.19 结果显示，研究区域地下水 F^- 分布与 Na^+ 分布比较一致，说明地下水 F^- 可能来自含水层矿物[如氟磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$]的水解。总体上，地下水 F 含量不高，多数采样点 F 含量小于 1.0mg/L，基本符合饮用水水质超标。但是，卢沟桥以东宛平县城附近存在一个地下水高 F 含量中心，最高 F 含量达到 1.4mg/L。

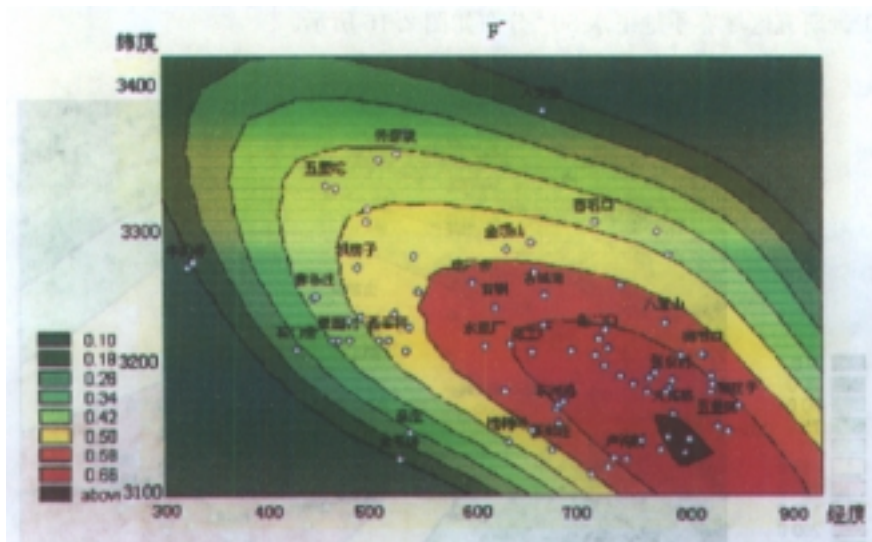


图 2.19 研究区域地下水 F 分布
Figure2.19 The F distribution of groundwater

2. 2. 2. 12 溶解性二氧化硅

由于地壳中广泛地存在硅的氧化物及与金属络合的多种硅酸盐矿物，致使所有天然水中都含有各种形态的硅，包括二氧化硅悬浮物、硅酸或硅酸盐类。地下水中一般可含有较多的二氧化硅，某些盐水中二氧化硅含量可以超过 100mg/L。由于易形成难以去除的硅酸盐垢，一些工业用水质量标准中对二氧化硅的含量作了限制性的规定。研究区域地下水溶解性二氧化硅分布结果如图 2.20 所示。

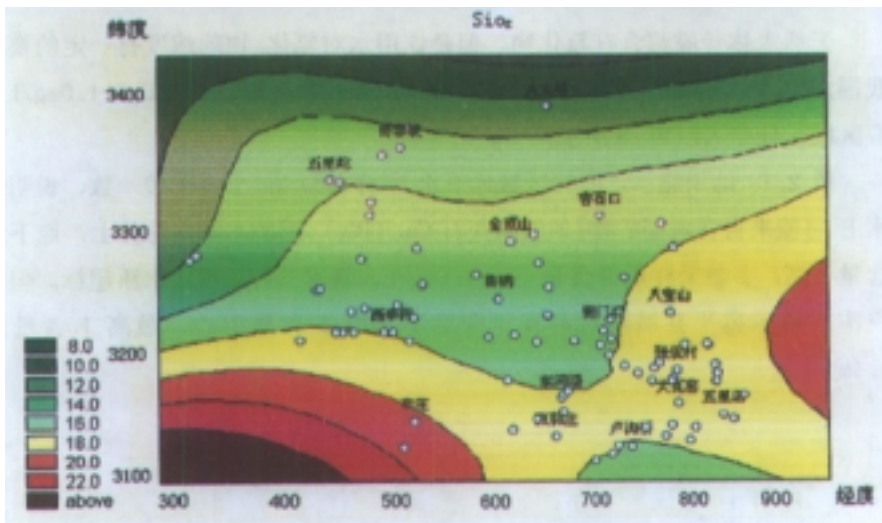


图 2.20 研究区域地下水溶解性二氧化硅分布
Figure2.20 The SiO₂ distribution of groundwater

图 2.20 结果显示,地下水溶解性二氧化硅分布与 TDS 分布比较相似,基本按照地下水径流方向变化。总体上,地下水溶解性二氧化硅含量差异不大,基本上可以分为三个区域。即冲积扇顶部,包括永定镇和石景山区,该区地下水溶解性二氧化硅含量平均 15.6mg/L;冲积扇中下部,包括张郭庄、张仪村和五里店等地,区域地下水溶解性二氧化硅含量平均 17.4mg/L;另外是山前地带,包括五里坨、中门寺、佟家坟和八大处等,区域地下水溶解性二氧化硅含量相对较低,平均含量 8.9mg/L。这些差异可能与地下水在含水层中的水化学过程有关。

2.2.2.13 地下水 TOC 分布

地下水总有机碳是指水中各种形式有机碳的总量,简称“TOC”。TOC 是表征地下水环境有机污染的指标,在地表水研究经常用到,而在地下水的研究很少用,主要是因为地下水在下渗过程由于微生物分解和土壤吸附等影响,达到地下含水层的有机污染物总量很少;同时,TOC 只是表征总有机碳含量,也不能对有机污染物种类和各自含量进行区分,因此,TOC 并不是地下水有机污染的敏感指标。本研究的目的在于调查研究区域地下水环境状况,因此同时测定地下水 TOC 含量,以对地下水可能的有机污染进行初步的判断,为进一步研究提供实验依据。研究区域地下水 TOC 分布如图 2.21 所示。

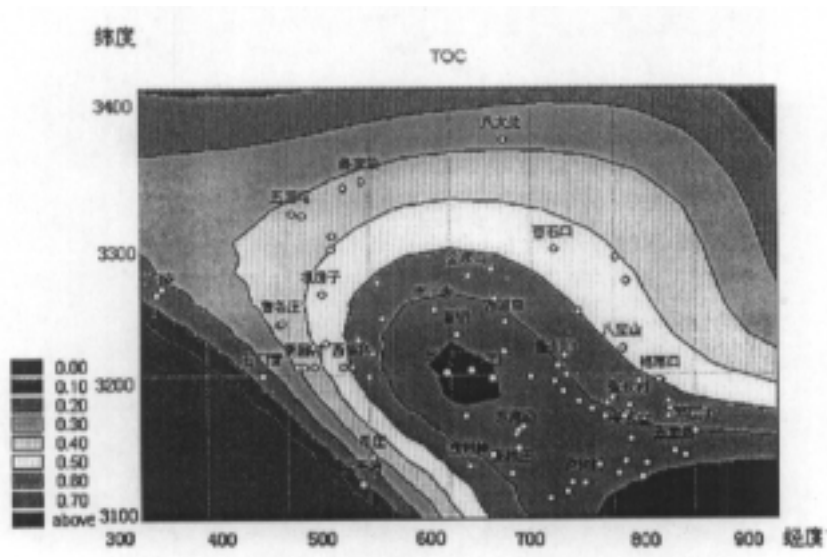


图 2.21 研究区域地下水总有机碳分布
Figure2.21 The TOC distribution of groundwater

图 2.21 结果显示, 研究区域地下水总有机碳分布以永定河河床为高浓度中心向两岸扩散, 并在化工厂和燕山水泥厂附近河床地下水形成高浓度 TOC 晕圈, 其中化工厂地下水 TOC 含量高达 2.36mg/L, 是周围地区 4-5 倍。这种分布可能与工业废水排放有关。实地调查发现, 由于永定河常年干涸, 河床裸露, 并广泛分布采砂后留下的大面积砂石坑, 这些砂石坑常常被附近的工厂作为工业废水的渗滤坑, 渗滤坑水质极其恶劣, 水的颜色发黑或发绿, 现场测定电导率和 pH 后发现, 工业废水 pH 一般小于 7.5, 而电导率却很高, 超过三家店地表水 3-5 倍, 说明含有较高的电解质。由此可以判断, 该地区地下水可能存在有机物污染。

第三章 地下水随季节变化规律

3.1 区域浅层地下水水位变化

区域浅层地下水主要接受大气降水渗入补给，其次是河水、灌溉水的渗入补给。大气降水控制了潜水的季节和多年变化，每年最低水位出现在雨季前 5-7 月，高水位出现在 8 月中旬及 9 月上旬。改变潜水动态的因素主要有两方面。其一、河流及灌溉的影响：在河流补给地下水的地段，河流动态的改变对地下水的影响较大。如三家店水库建成以后，基本拦蓄官厅山峡来水为京企业供水，很少补充下游地下水；只有在官厅水库放水后才有过多地表水补给地下水，官厅水库放水一般在 4 月份前。由于放水的量不大，其对地下水位的影响是暂时的，全年地下水位主要还是由降水控制；年最高水位一般出现在夏季暴雨过后的 8-9 月份。其二、长期集中开采影响，研究区域由于处于北京重工业区，也是重要的水源地，由于连年过量开采，长期来看，潜水位在逐年下降。为考察研究区域地下水年动态变化，本研究分别在低水位的 4 月份相对高水位的 10 月份采样，不同区域差别地下水位高程变化如图 3.1 所示。

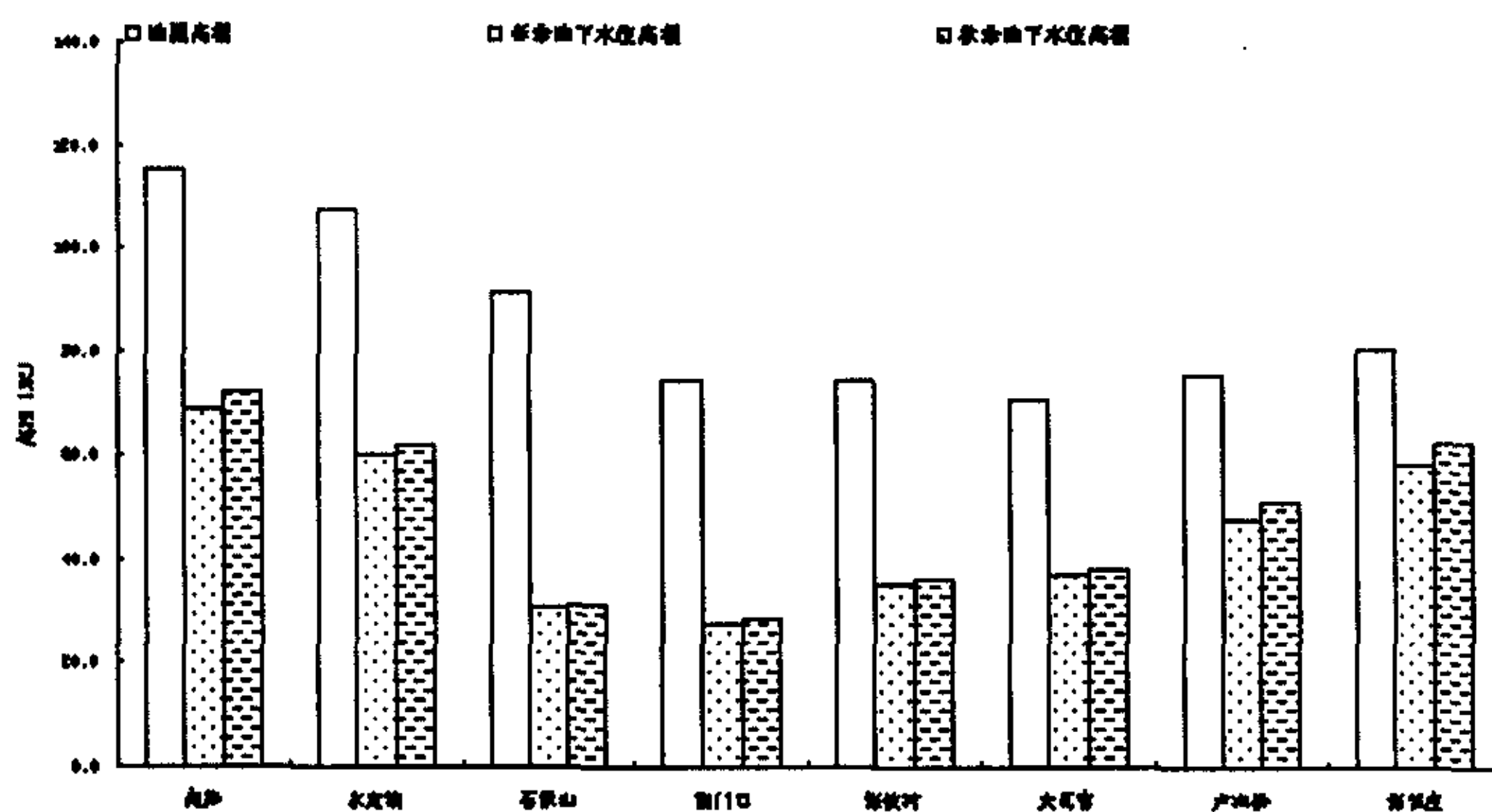


图 3.1 地下水位高程变化

Figure 3.1 The level change of groundwater

其中高井区包括五里坨、煤校、折反段和粉煤灰厂四个采样点；永定镇区包括冯村、曹各庄、疗养院、栗园村、党校、西辛秤村、东辛秤、增圣庄和坝房子村等 11 个采样点；石景山区包括北辛安、首钢、水屯北、古城南路、林业局家属院、

金顶山、杏石口、锦绣大地、永定化工厂、燕山水泥厂、养马厂和永定河管理处等 15 个采样点；衙门口区包括八宝山、鲁谷、煤气储配厂和衙门口等 9 个采样点；张仪村包括西大棚、西果园、南果园和村部等 7 个采样点；大瓦窑区包括卢沟桥、宛平县、五里店、郭庄子、大瓦窑、西南坟、梅市口、四顷地、吴家村和小瓦窑等 17 个采样点；张郭庄区包括张郭庄村和东河沿村等 7 个采样点。

图 3.1 结果显示，研究区域地下水位高程有两个水头，即三家店水头和张郭庄水头，其中三家店地区地下水集水区域包括三家店地表水下渗和北京西山（包括潭峪和八大处等）南坡补给，该地下水径流由三家店开始，流向永定镇，再向东流到石景山区，向南顺河床方向流向衙门口；与衙门口相邻的张仪村水头高于衙门口，说明该地区地下水来自其他水头的补给。图 3.1 显示，该区域水头在张郭庄一带，与前面由地下水化学成分分布所预测的结果相吻合。该地区的地下水可能是跨含水层补给的，其集水区域可能在潭柘寺-大灰厂以西富水碳酸岩地区。张郭庄水头略低于三家店，但是地下水埋藏深度却远低于三家店，平均埋深 18-22 米之间，三家店含水层平均埋深 43-46 米；卢沟桥东和大瓦窑等区地下水主要来自张郭庄的补给。

就不同季节地下水位变化而言，十月份地下水位高于四月份，其中山前冲洪积扇顶部，如张郭庄和高井一带，地下水位变化最大，十月份分别比四月份升高 4.3 米和 3.0 米，永定镇十月份地下水位较四月份升高 1.8 米；卢沟桥十月份地下水位比四月份升高 3.1 米，明显高于其他平原地区，这种变化可能与地表径流补给有关；平原地区地下水年变化小于 1 米，其中石景山区年变化仅 0.5 米。

3.2 地下水温度变化

地下水温度是影响水化学过程的重要因素，研究区域地下水温变化如图 3.2 所示。

图 3.2 结果显示，十月份地下水温度明显高于四月份，整个区域地下水平均温度较升高 2.5°C 。显然，这种变化与气温变化有关。就不同区位而言，石景山区和衙门口地下水温度和年变化都大于其他地区，这种差异可能与地下水污染和工业排放热废水等因素有关。

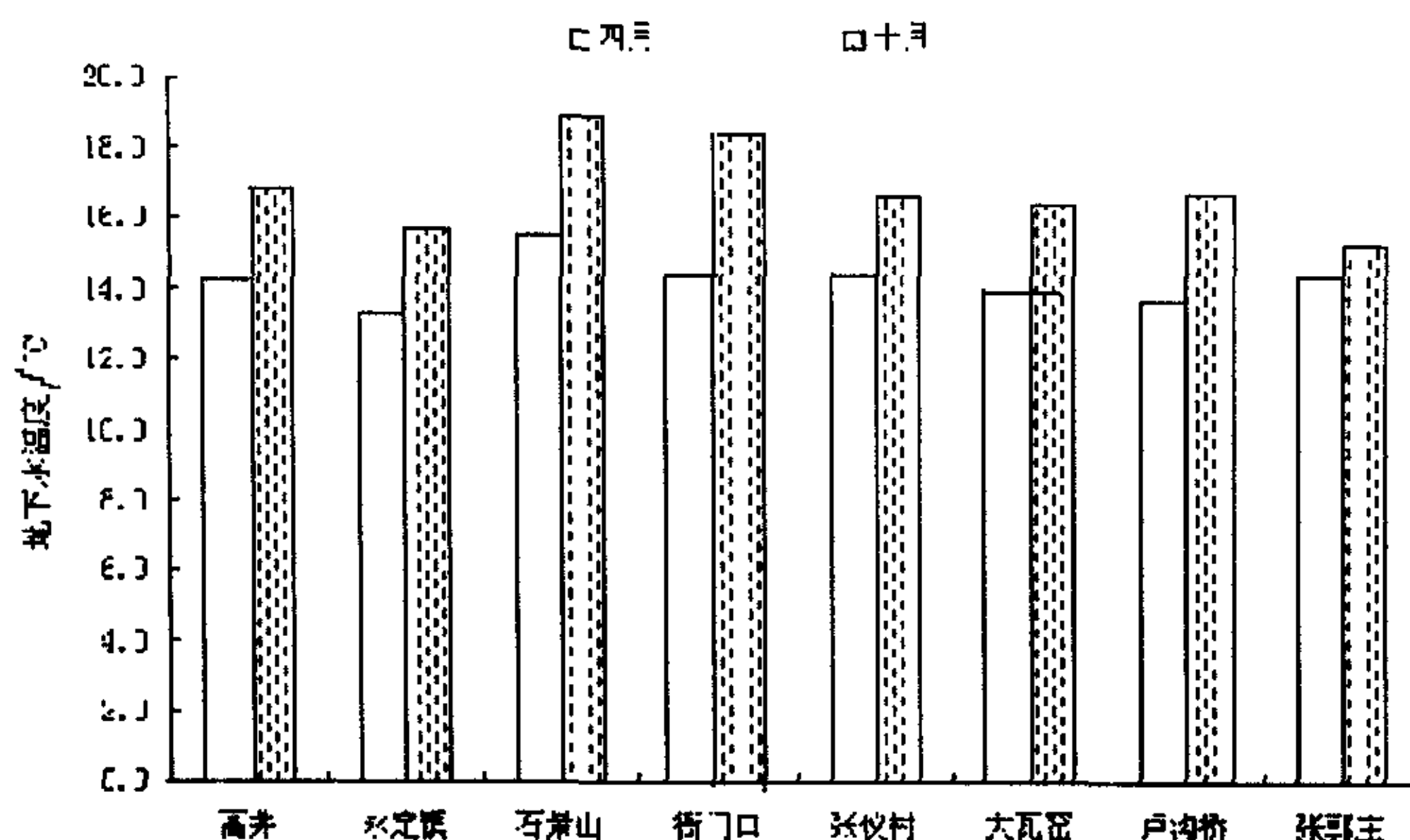


图 3.2 地下水温度随季节变化

Figure3.2 The change of temperature in various seasons

3.3 地下水 TDS 变化

图 3.3 结果显示, 不同区域地下水总溶解固体含量有明显差异, 其中衙门口区 TDS 含量最高, 年平均含量 727.7mg/L, 水头位置 TDS 含量最低, 如高井和张郭庄两区地下水 TDS 年平均含量分别为 443.8mg/L 和 558.1mg/L。

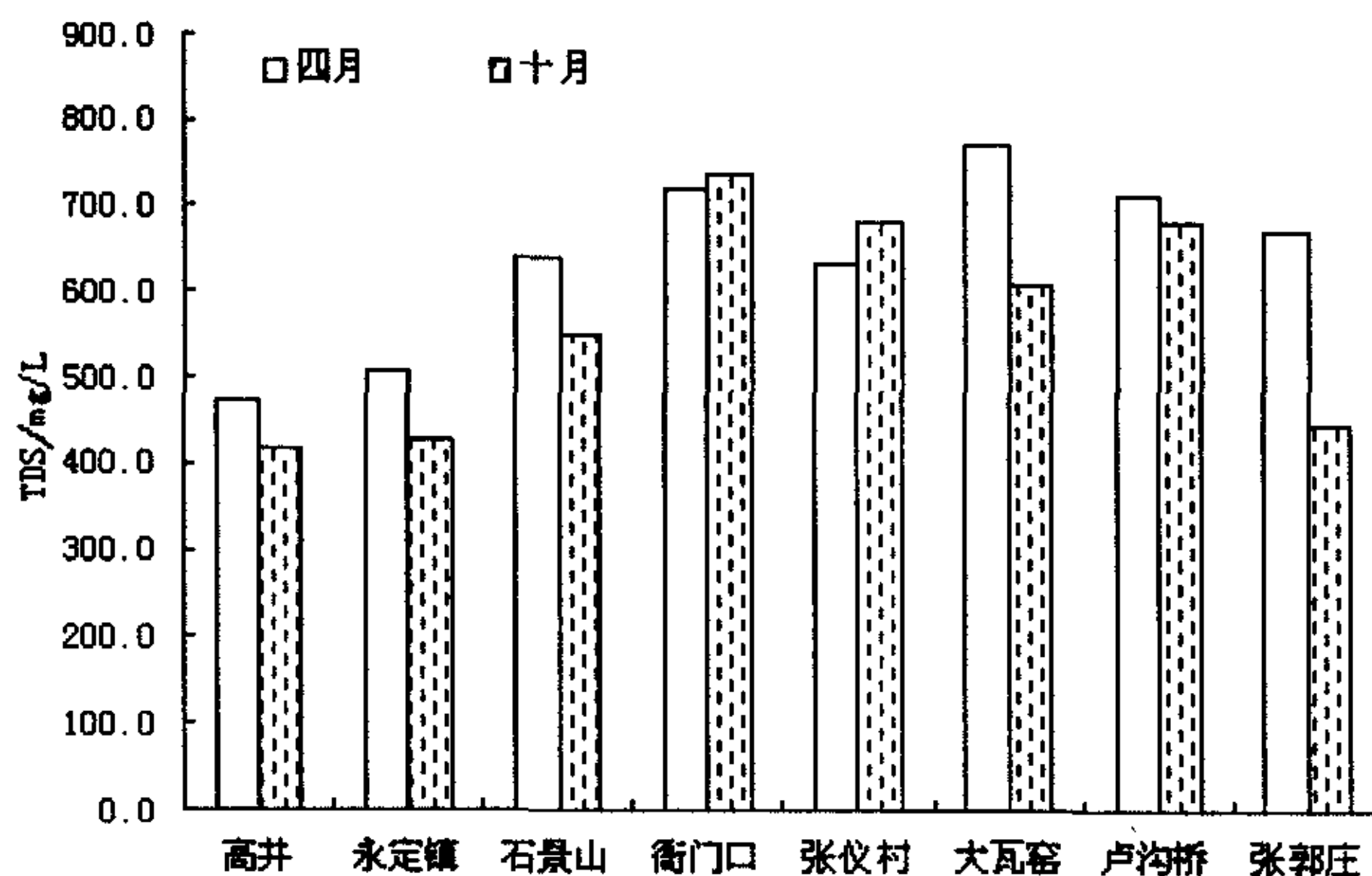


图 3.3 地下水总溶解固体含量随季节变化

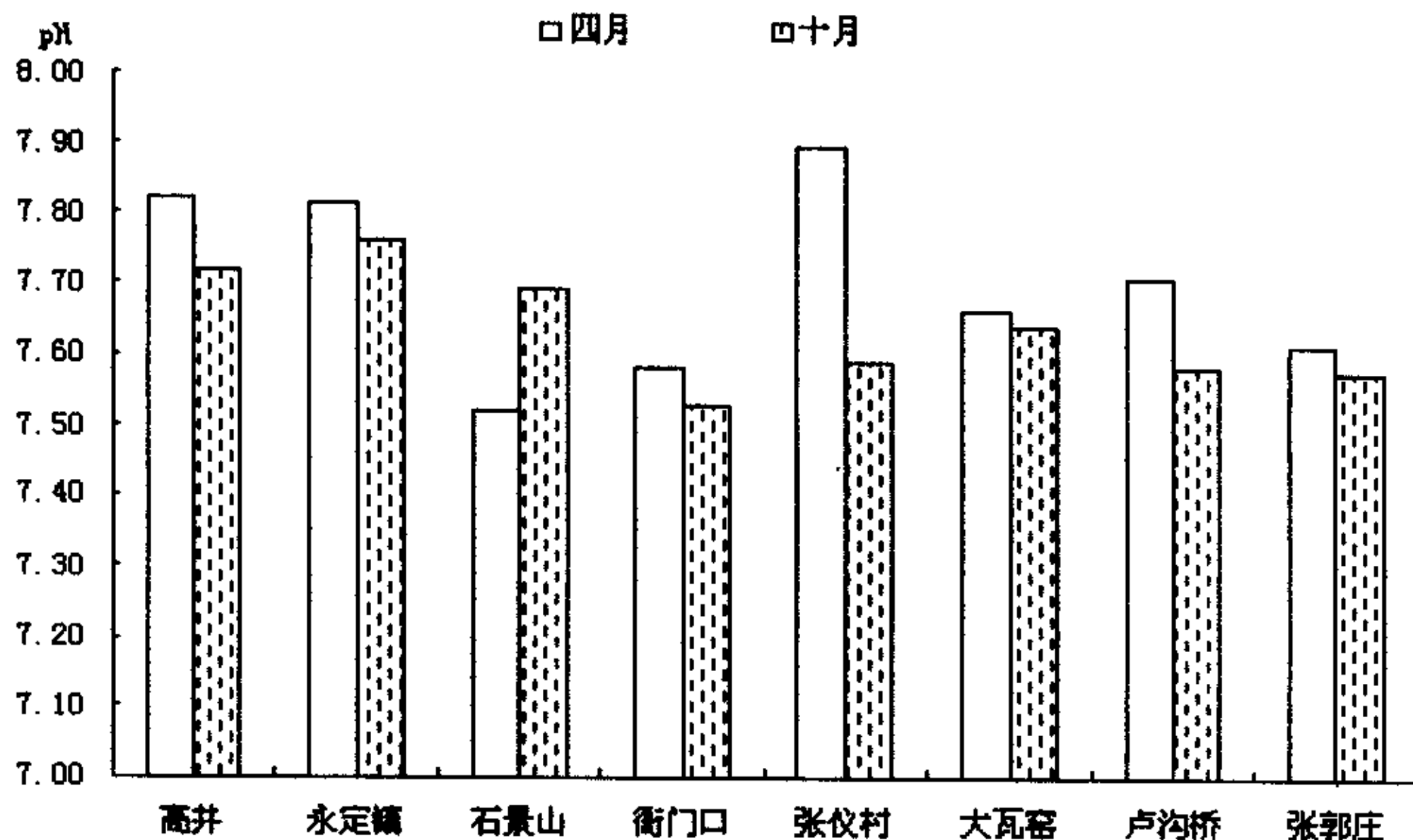
Figure3.3 The change of TDS in various seasons

总体上, 地下水 TDS 随着径流方向逐渐增加。就不同季节而言, 秋季地下水 TDS 低于春季。这是因为北京降水主要集中在夏季和秋季, 两季节降水量占全年

90%以上, 尤其是夏季。降水补给地下水后使地下达到年最高水位, 而大气降水是软水, TDS 含量很低, 从而降低秋季地下水 TDS。局部上, 高井地下水支流 TDS 年变化小于张郭庄, 十月份分别比四月份减少 56.2mg/L 和 226.9mg/L, 这从一个侧面可能反映了降水补给量差异。其中张郭庄支流降水补给量大, 由此引起的稀释效应更加明显, 反之亦然。另外, 衙门口和张仪村秋季地下水 TDS 增加, 这种变化可能与人为污染有关。至于卢沟桥地下水 TDS 高于周围地区, 可能也与工业排放污水有关。

3.4 地下水 pH 变化

图 3.4 结果显示, 研究区域秋季地下水 pH 有降低趋势。其中, 张仪村地下水 pH 降低最多, 年平均变化达到 0.30 pH 单位, 整个区域地下水四月份平均 pH 为 7.70, 十月平均为 7.63。不同区域地下水 pH 年变化平原地区大于山前冲洪积扇。这种变化与地下水碳酸平衡体系有关。由于地下含水层 CO_2 含量较少, 因



此, pH 更大程度上取决于 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的平衡。由于本区域 pH 总体上小于 8.34, pH 更大程度上决定与 HCO_3^- 浓度。因此, 该地区地下水 pH 降低可能与秋季地下水稀释导致 HCO_3^- 降低有关。局部地区, 如石景山地下水 pH 反而升高, 其原因可能与工业污染等因素有关。

3.5 地下水碱度季节变化

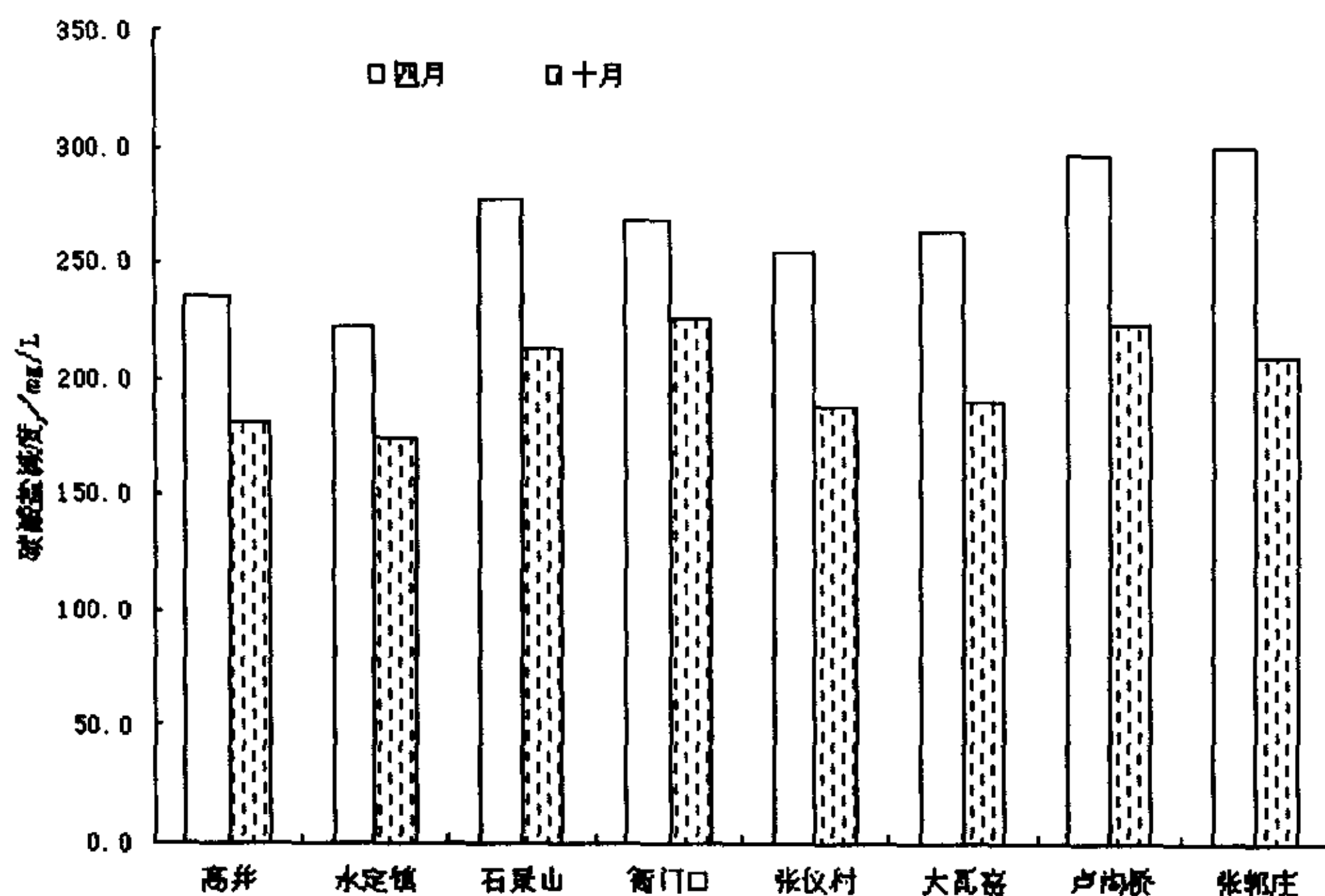


图 3.5 地下水碱度随季节变化

Figure3.5 The change alkalinity of content in various seasons

地下水碱度是表征水系统酸碱平衡特征的指标。地下水碱度一般取决于水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量，可直接测定，或通过计算求得。计算方法是 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的毫克当量/L 的总和乘 50，以 CaCO_3 表示，称碳酸盐碱度。研究区域不同季节地下水碱度计算结果如下图 3.5 所示。

图 3.5 结果显示，研究区域十月地下水碳酸盐碱度明显低于四月，其中四月碳酸盐碱度总体平均 264.8mg/L，十月平均 201.0mg/L；不同区位地下水碱度变化表现为张郭庄支流大于永定河支流。其中张郭庄支流十月碳酸盐碱度平均为 203.0mg/L，比四月降低 75.9mg/L；永定河支流平均降低 51.7mg/L。这种变化与 TDS 季节变化趋势相似，说明地下水总碱度降低可能与大气降水稀释有关。

3.6 地下水 Ca^{2+} 含量季节变化

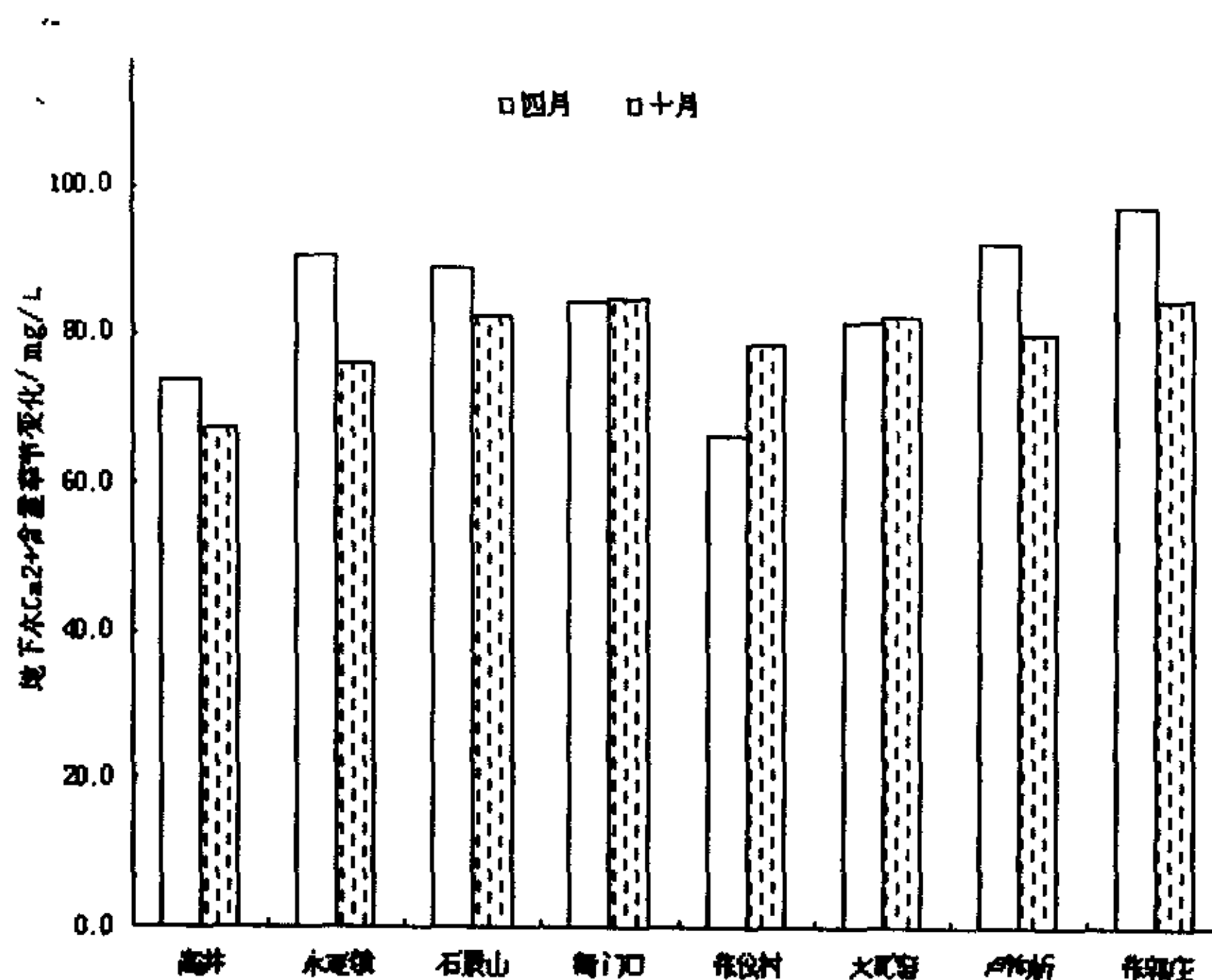


图 3.6 地下水 Ca^{2+} 含量随季节变化

Figure 3.6 The change Ca^{2+} of content in various seasons

如图所示, Ca^{2+} 含量季节变化与 TDS 基本相似。即受大气降水稀释的影响, 十月份地下水 Ca^{2+} 含量逐渐降低, 整个区域 Ca^{2+} 含量平均降低 4.8mg/L, 与碳酸盐碱度比较变化不大。不同区域变化略有差异, 其中衙门口和张仪村秋季地下水 Ca^{2+} 含量增加, 其原因与 TDS 变化有关。

3.7 地下水 Mg^{2+} 含量季节变化

图 3.7 结果显示, 地下水 Mg^{2+} 季节变化与 TDS、 Ca^{2+} 和碳酸盐碱度变化都比较相似。总体上表现为秋季地下水 Mg^{2+} 浓度降低, 局部 Mg^{2+} 含量增加。就不同支流而言, 张郭庄地下水 Mg^{2+} 浓度年变化大于永定河支流, 其中张郭庄十月份地下水 Mg^{2+} 浓度较四月份减少 9.2mg/L, 变化幅度达 28%, 而永定河支流变化幅度小于 16%。其中原因可能与大气降水补给强度差异有关。

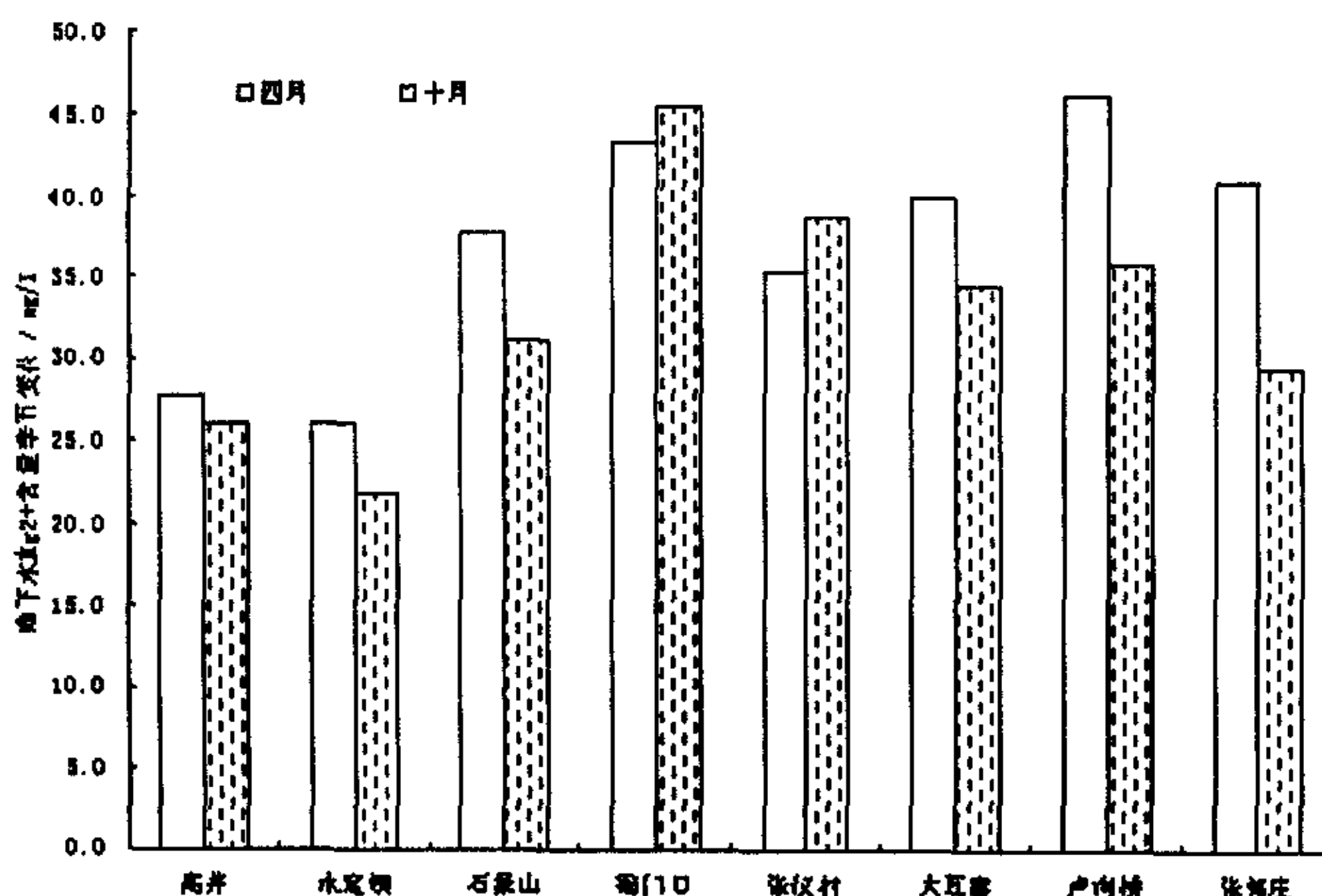


图 3.7 地下水 Mg^{2+} 随季节变化

Figure 3.7 The change of Mg^{2+} content in various seasons

3.8 地下水 Na^+ 含量变化

地下水中 Na^+ 属于碱金属。图 3.8 显示不同季节区域地下水 Na^+ 含量变化。

图 3.8 结果显示，研究区域不同季节地下水 Na^+ 含量变化趋势与 TDS、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等相似，说明地下水 TDS 主要由这些离子组成，由于地下水中主要离子含量变化，TDS 也随之变化。

图 3.8 结果还显示，地下水中 Na^+ 含量随地下水径流急剧增加。例如，永定河支流中，永定河冲洪积扇顶部高井和永定镇两个采样区十月份地下水 Na^+ 平均含量仅 45.4mg/L，到石景山和衙门口后 Na^+ 含量分别增加到 71.4mg/L 和 116.4mg/L，增加幅度达 56.6% 和 156.4%； Na^+ 是高矿化地下水中主要离子，由此说明，永定河冲洪积扇地下水由低矿化度向高矿化度转变。就不同区域而言，平原区域地下水 Na^+ 含量高于山前冲积扇地下水。

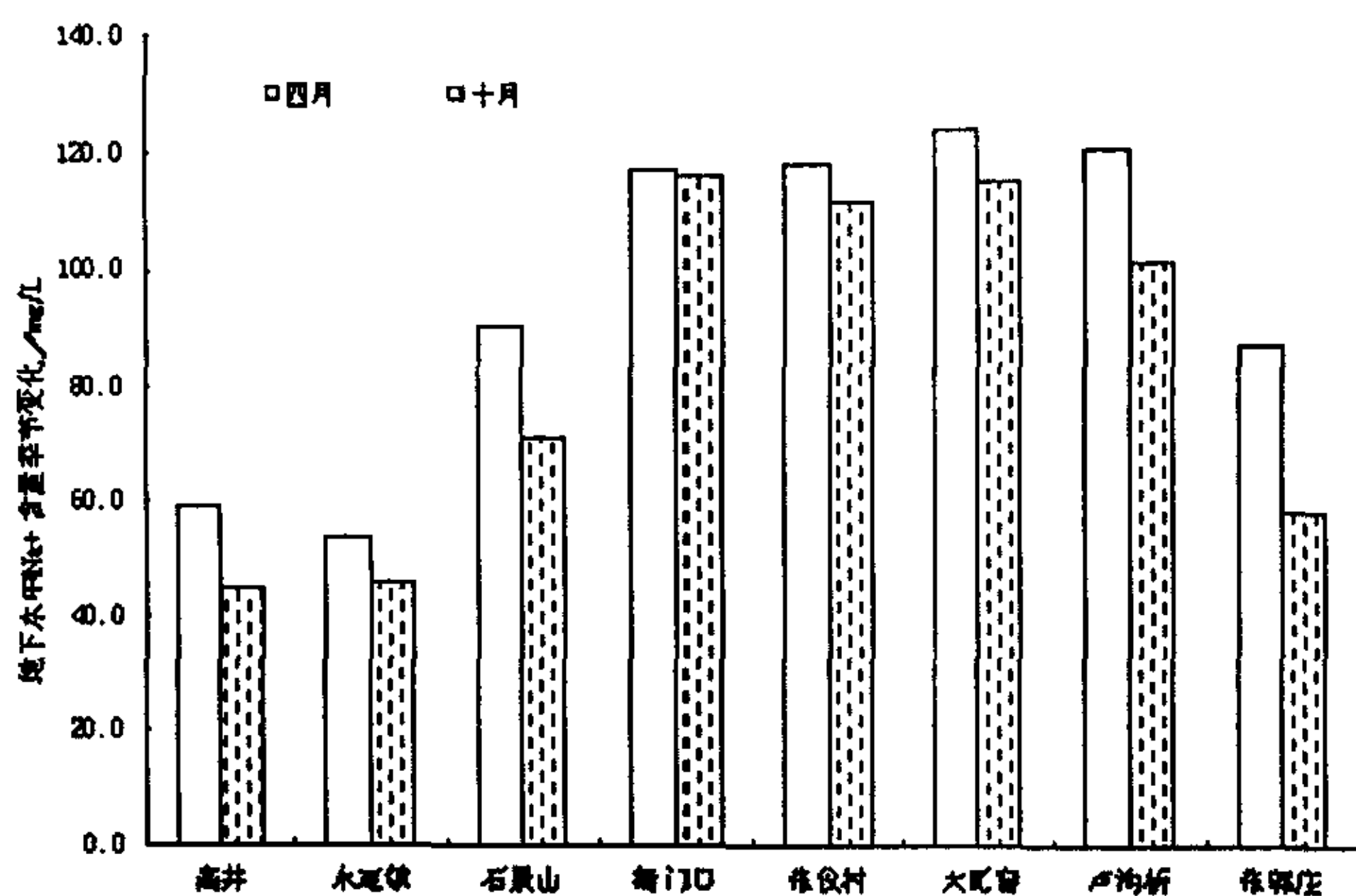


图 3.8 地下水中 Na⁺ 含量随季节变化

Figure 3.8 The change of Na⁺ and content in various seasons

3.9 地下水中 SO₄²⁻ 季节变化

图 3.9 结果显示, 地下水 SO₄²⁻ 季节变化趋势与 TDS 及其组成离子 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 和 K⁺ 等基本一致, 这是因为 SO₄²⁻ 是组成 TDS 的主要离子之一。

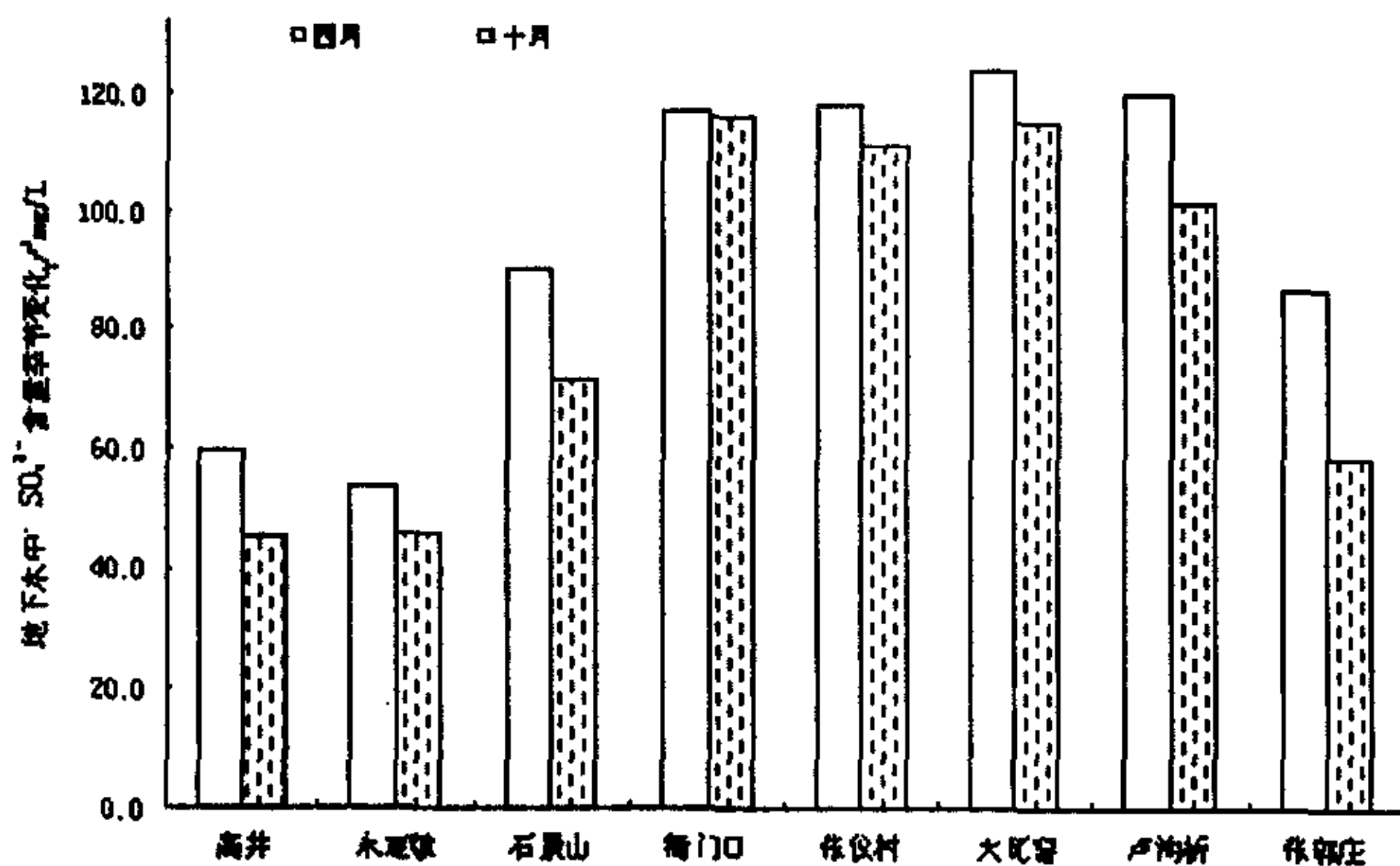


图 3.9 地下水 SO₄²⁻ 季节变化

Figure 3.9 The change of SO₄²⁻ content in various seasons

就不同区域地下水 SO₄²⁻ 含量差异而言, 山前冲积扇地下水受大气降水稀释作用影响, 秋季地下水 SO₄²⁻ 含量减少, 其中高井和永定镇区域地下水十月和四月 SO₄²⁻ 含量平均分别为 100.1mg/L 和 95.4mg/L, 降水稀释 SO₄²⁻ 浓度降低 5.0% 左右; 平原

响, 秋季地下水 SO_4^{2-} 含量减少, 其中高井和永定镇区域地下水十月和四月 SO_4^{2-} 含量平均分别为 100.1mg/L 和 95.4mg/L, 降水稀释 SO_4^{2-} 浓度降低 5.0%左右; 平原地区, 包括衙门口、张仪村和大瓦窑, 地下水 SO_4^{2-} 含量增加, 这些地区十月和四月地下水 SO_4^{2-} 含量平均分别为 130.4mg/L 和 150.5mg/L, 区域地下水 SO_4^{2-} 浓度升高 13%左右。这种差异可能与“酸雨”等污染有关。

3.10 地下水中 Cl^- 季节变化

图 3.10 结果显示, 研究区域地下水 Cl^- 季节变化 Na^+ 和 K^+ 极其相似, 这是因为 Cl^- 、 Na^+ 和 K^+ 都易溶于水, 随着矿化度升高其含量也增加。区间计算结果表明, 冲洪积扇顶部地下水 Cl^- 含量明显高于中部和平原地区。例如, 高井、永定镇、石景山和衙门口区间 Cl^- 年平均含量分别为 63.5、75.4、105.4 和 179.3mg/L; 张郭庄支流也表现相同的趋势。就不同季节变化而言, 山前冲积扇地下水 Cl^- 含量因为大气降水稀释而减少, 例如, 高井、永定镇和张郭庄十月地下水 Cl^- 含量平均分别为 61.3、70.0 和 78.6mg/L, 比四月份分别减少 4.5mg/L, 10.7mg/L 和 19.5mg/L。

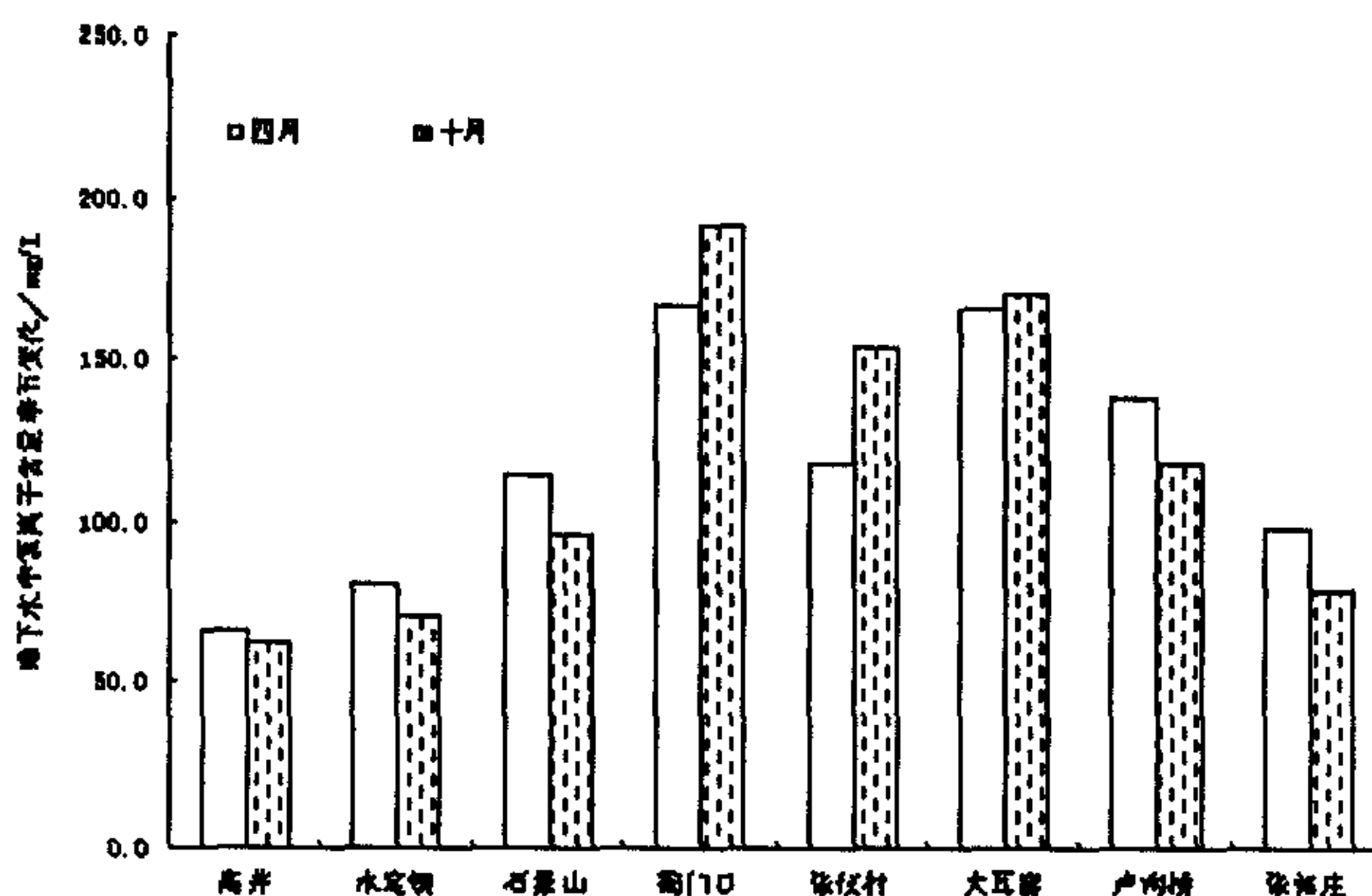


图 3.10 研究区域地下水 Cl^- 含量随季节变化

Figure 3.10 The change of Cl^- content in various seasons

平原地区十月地下水 Cl^- 含量则比四月增加, 其中衙门口、张仪村和大瓦窑村十月地下水 Cl^- 含量分别比四月增加 24.2mg/L、35.8mg/L 和 4.1mg/L。说明平原地区地下水向高矿化度转变。

3.11 地下水中 F^- 含量季节变化

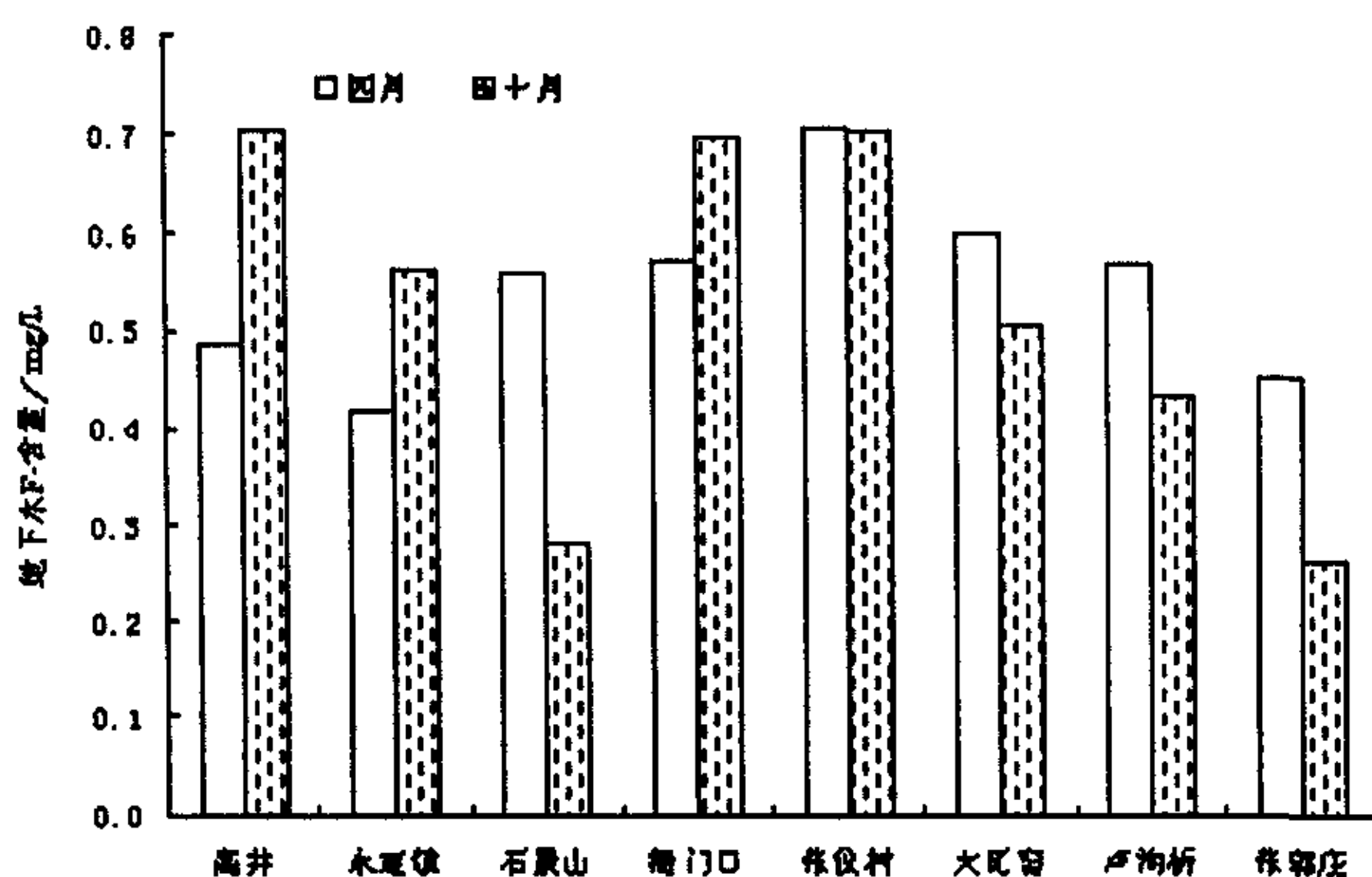


图 3.11 地下水 F^- 含量随季节变化

Figure 3.11 The change of F^- content in various seasons

图 3.11 结果显示, 不同区位地下水 F^- 含量季节变化有较大差异, 其中高井、永定镇和衙门口地下水秋季地下水 F^- 含量增加, 三个采样区十月份区域地下水 F^- 平均含量分别为 0.70、0.56 和 0.70mg/L, 分别比四月份增加 0.21、0.14 和 0.13mg/L, 增加幅度达 20% 以上; 石景山区十月份地下水 F^- 含量则明显减少, 春秋两季 F^- 平均含量分别为 0.56mg/L 和 0.28mg/L, 十月份地下水 F^- 含量减少一半。与永定河支流不同的是, 张郭庄秋季地下水 F^- 含量都表现减少趋势, 其中张郭庄、卢沟桥和大瓦窑十月份地下水 F^- 含量分别比四月份减少 0.19、0.13、和 0.09mg/L, 减少幅度大于 20%。总体上, 永定河冲积扇中下部和山前地下水 F^- 含量低于冲积扇顶部和平原地区。这种差异可能与水文地质条件差异有关。

第四章 地下水化学指标分析

4.1 地下水化学指标相关分析

以上分析结果表明,研究区域地下水环境和化学成分各指标在空间和时间上的变化具有普遍的联系性。例如地下水 TDS 在空间分布和随时间变化上与其他化学成分指标 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、硬度和碱度等都有明显的依变性。说明以上讨论各个指标之间存在一定的相关性,为检验这种相关性,以下分别计算地下水面高程、埋深、温度、电导率、pH、DO、TDS、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 F^- 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、TOC 和溶解性二氧化硅共 21 项指标的相关

表 4.1 分析结果表明,地下水面高程和埋深与地下水化学成分指标,如 Ca^{2+} 、 $\text{Mg}^{2+}\text{HCO}_3^-$ 和 TDS 等,相关都达到显著或极显著水平。这是因为地下水面高程决定了地下水径流方向,而地下水径流与含水层矿物溶解密切相关,所以不难理解地下水埋藏条件与地下水化学成分指标之间的相关性;但是表 4.2 计算结果还表明,地下水埋藏条件与地下水环境特征指标,如水温 and pH 等相关不显著。这由地下水温 and pH 空间分别可以看出,水温与坡向有关,而 pH 取决于地下水碳酸平衡体系。同理,地下水温度除了与溶解氧相关达到极显著水平外,与地下水化学成分相关不显著。但是, pH 与地下水化学成分各指标,如 TDS、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等,相关都达到显著水平以上;但与地下水环境特征指标,如地下水温 and 埋藏条件等,相关不显著,这从另一侧面说明了地下水 pH 与碳酸平衡的相关性。

表 4.1 计算结果表明,地下水 TDS、电导率和盐度与地下水化学成分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等之间的相关性极显著。其中, TDS、电导率和盐度除了与水温相关不显著及与 NH_4^+ 相关达显著水平外,与其他所有指标相关都达到极显著水平,说明 TDS、电导率和盐度基本可以概括地下水化学特征。事实上, TDS、电导率和盐度是综合体现水环境质量的重要指标,也是研究水文地球化学问题最综合的指标。另外,地下水中主要离子成分相互之间相关均达到极显著水平。其中 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等除了部分指标与 NH_4^+ 或温度相关不显著外,与其他所有指标相关都达到显著水平以上。主要离子中 Ca^{2+} 和 NO_3^- 在与其他化学指标相关性上比较相似, Ca^{2+} 和 NO_3^- 都与地下水环境特征如温度和 DO, 与地下水主要离子成分,如 NH_4^+ 、 Na^+ 和 K^+ 等,相关不显著,但是 Ca^{2+} 和 NO_3^- 相互间的相关极显著。另外,地下水中 TOC 与 F^- 也比较相似,二者相关也达到显著水平,而且均与 pH、 Ca^{2+} 和 NO_3^- 等指标相关不显著,说明以上成分可能在来源上有一定的联

系。

总体上,地下水温度、pH 和 NH_4^+ 等指标是相对比较独立的。其中 NO_3^- 与水温、DO、 F^- 、 NH_4^+ 、TOC、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Ba^{2+} 和 Sr 等 10 项指标相关不显著;除这些指标外, NH_4^+ 还与 SiO_2 、pH、Ca、Mg 和 HCO_3^- 等 11 项指标相关不显著。这是因为地下水氮素一般来自人为污染, NO_3^- 和 NH_4^+ 空间分布分析结果表明,研究区域地下水 NO_3^- 和 NH_4^+ 分布与其他离子有很大差异。

由此可见,以上分析的 21 项指标在很大程度上是显著相关的,因此可以通过综合指标反映地下水环境特征与化学组成。以下应用聚类分析方法对这些指标进行分类,以寻求不同指标之间的简单关系。

表 4.1 地下水环境特征与化学成分指标相关系数及相伴概率 (p) 计算结果

Table 4.1 The characteristic and compound relationship of groundwater

	高程	埋深	温度	电导率	盐度	TDS	溶解氧	pH	SiO ₂	F
埋深	0.653									
	$p=0.000$									
温度	-0.407	-0.137								
	$p=0.044$	$p=0.515$								
电导率	-0.824	-0.748	0.393							
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.052$							
盐度	-0.809	-0.771	0.372	0.985						
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.067$	$p=0.000$						
TDS	-0.821	-0.744	0.401	1.000	0.985					
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.047$	$p=0.000$	$p=0.000$					
溶解氧	0.705	0.330	-0.717	-0.585	-0.560	-0.585				
	$p=0.000$	$p=0.107$	$p=0.000$	$p=0.002$	$p=0.004$	$p=0.002$				
pH	0.390	0.393	-0.268	-0.588	-0.564	-0.586	0.443			
	$p=0.054$	$p=0.052$	$p=0.196$	$p=0.002$	$p=0.003$	$p=0.002$	$p=0.027$			
SiO ₂	-0.645	-0.371	0.128	0.579	0.546	0.578	-0.404	-0.284		
	$p=0.000$	$p=0.068$	$p=0.543$	$p=0.002$	$p=0.005$	$p=0.002$	$p=0.045$	$p=0.169$		
F ⁻	-0.765	-0.585	0.463	0.692	0.719	0.690	-0.606	-0.285	0.234	
	$p=0.000$	$p=0.002$	$p=0.020$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.001$	$p=0.168$	$p=0.260$	
NH ₄ ⁺ -N	-0.390	-0.544	0.347	0.450	0.460	0.453	-0.356	-0.202	0.098	0.476
	$p=0.054$	$p=0.005$	$p=0.089$	$p=0.024$	$p=0.021$	$p=0.023$	$p=0.081$	$p=0.332$	$p=0.642$	$p=0.016$
TOC	-0.586	-0.476	0.379	0.740	0.726	0.741	-0.447	-0.344	0.297	0.564
	$p=0.002$	$p=0.016$	$p=0.062$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.025$	$p=0.093$	$p=0.149$	$p=0.003$
Ca ²⁺	-0.523	-0.684	0.220	0.728	0.711	0.726	-0.430	-0.552	0.556	0.252
	$p=0.007$	$p=0.000$	$p=0.290$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.032$	$p=0.004$	$p=0.004$	$p=0.225$
Mg ²⁺	-0.821	-0.767	0.275	0.965	0.948	0.963	-0.525	-0.594	0.587	0.651
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.183$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.007$	$p=0.002$	$p=0.002$	$p=0.000$
K ⁺	-0.698	-0.550	0.307	0.785	0.758	0.787	-0.366	-0.315	0.415	0.656
	$p=0.000$	$p=0.004$	$p=0.136$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.072$	$p=0.125$	$p=0.039$	$p=0.000$
Na ⁺	-0.838	-0.679	0.492	0.924	0.912	0.924	-0.586	-0.486	0.399	0.841
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.012$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.002$	$p=0.014$	$p=0.048$	$p=0.000$
HCO ₃ ⁻	-0.737	-0.626	0.157	0.801	0.773	0.796	-0.442	-0.471	0.685	0.508
	$p=0.000$	$p=0.001$	$p=0.453$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.027$	$p=0.017$	$p=0.000$	$p=0.010$
SO ₄ ²⁻	-0.738	-0.829	0.443	0.865	0.858	0.864	-0.604	-0.573	0.460	0.654
	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.027$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.001$	$p=0.003$	$p=0.021$	$p=0.000$
Cl ⁻	-0.688	-0.626	0.421	0.902	0.886	0.905	-0.502	-0.525	0.384	0.590
	$p=0.000$	$p=0.001$	$p=0.036$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.011$	$p=0.007$	$p=0.058$	$p=0.002$
NO ₃ ⁻ -N	-0.512	-0.558	0.099	0.691	0.667	0.688	-0.306	-0.569	0.679	0.206
	$p=0.009$	$p=0.004$	$p=0.639$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.137$	$p=0.003$	$p=0.000$	$p=0.323$
Ba ²⁺	-0.718	-0.543	0.430	0.670	0.651	0.669	-0.501	-0.325	0.324	0.727
	$p=0.000$	$p=0.005$	$p=0.032$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.011$	$p=0.113$	$p=0.114$	$p=0.000$
Sr	-0.686	-0.404	0.334	0.734	0.711	0.734	-0.480	-0.293	0.220	0.716
	$p=0.000$	$p=0.045$	$p=0.103$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.000$	$p=0.015$	$p=0.156$	$p=0.290$	$p=0.000$

表 4.2 地下水环境特征与化学成分指标相关系数及相伴概率 (p) 计算结果 (续上表)

Table 4.2 The characteristic and compound relationship of groundwater

	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TOC	Ca	Mg	K	Na	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ba
NH ₄ ⁺ -N	0.143										
	p=. 497										
TOC	0.407	0.145									
	p=. 044	p=. 490									
Ca ²⁺	0.722	0.266	0.376								
	p=. 000	p=. 199	p=. 064								
Mg ²⁺	0.722	0.319	0.729	0.748							
	p=. 000	p=. 120	p=. 000	p=. 000							
K ⁺	0.451	0.456	0.738	0.275	0.742						
	p=. 024	p=. 022	p=. 000	p=. 184	p=. 000						
Na ⁺	0.474	0.492	0.737	0.472	0.868	0.867					
	p=. 017	p=. 012	p=. 000	p=. 017	p=. 000	p=. 000					
HCO ₃ ⁻	0.853	0.148	0.547	0.655	0.863	0.631	0.694				
	p=. 000	p=. 482	p=. 005	p=. 000	p=. 000	p=. 001	p=. 000				
SO ₄ ²⁺	0.583	0.493	0.558	0.804	0.846	0.567	0.791	0.648			
	p=. 002	p=. 012	p=. 004	p=. 000	p=. 000	p=. 003	p=. 000	p=. 000			
Cl ⁻	0.428	0.502	0.746	0.616	0.824	0.756	0.857	0.511	0.749		
	p=. 033	p=. 011	p=. 000	p=. 001	p=. 000	p=. 000	p=. 000	p=. 009	p=. 000		
Ba ²⁺	0.356	0.509	0.428	0.263	0.595	0.708	0.774	0.523	0.512	0.629	
	p=. 080	p=. 009	p=. 033	p=. 203	p=. 002	p=. 000	p=. 000	p=. 007	p=. 009	p=. 001	
Sr	0.171	0.393	0.655	0.295	0.665	0.675	0.795	0.394	0.519	0.814	0.706
	p=. 414	p=. 052	p=. 000	p=. 152	p=. 000	p=. 000	p=. 000	p=. 051	p=. 008	p=. 000	p=. 000

4.2 地下水化学指标聚类分析

聚类分析是应用多元统计分析原理研究分类问题的一种数学方法，主要研究各种事物或发现的分类，例如土壤分类、作物品种分类、微生物细菌分类、地质条件分类等等。近年来，聚类分析方法发展很快，已经被广泛地应用到地质勘探、天气预报、植物分类、农业气候区划与经济分析等许多方面。

一般我们把分类依据的条件称为指标或变量，而把要对其进行分类的对象成为样品。为了根据变量对样品进行分类，就要研究样品之间的关系。研究样品间的关系常用两种方法，一种是距离法，它是将每一个样品看成为 m 维空间的一个点 (m 是样品的指标个数)，这样研究样品间的关系就可以转化为研究 m 维空间中点与点之间的关系，而点与点之间的关系常用距离来表示，并根据点与点之间的距离进行分类，即将距离较近的点归为一类，而将距离远的点归为不同的类；另一种方法是采用相似系数法，即越比较相近的样品，它们的相似系数越接近于 1 (或接近-1)，而彼此无关的样品相似系数接近于 0，这样就可以根据样品相似系数的值把比较相似的样品归为一类，而不相似的样品归为不同的类。本研究采用距离法进行系统聚类。

所有指标欧氏距离 (Euclidean distances) 计算结果如表 4.3 所示。

表 4.3 地下水分析指标聚类分析欧氏距离计算结果
Table 4.3 The analyses and results of groundwater

指标	电导率	TDS	盐度	NO_3^-	NH_4^+	F^-	TOC
欧氏距离	584.1	529.0	513.8	114.1	114.1	113.8	113.8
指标	K^+	SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Cl^-	Na^+	Ca^{2+}	HCO_3^-
欧氏距离	111.6	111.6	111.2	110.9	110.5	110.1	109.0
指标	DO	pH	水温度	SiO_2	埋深	高程	
欧氏距离	106.8	106.7	100.2	98.5	79.0	42.8	

根据表 4.3 欧氏距离可以把以上指标分为以下几类：

第一类：高程，地下水埋深

第二类：电导率，TDS，盐度

第三类：地下水温度，溶解氧，pH， SiO_2

第四类： NO_3^- ， NH_4^+ ， F^- ，TOC

第五类： K^+ ， SO_4^{2-} ， Mg^{2+} ， Cl^- ， Na^+ ， Ca^{2+} ， HCO_3^-

显然，第一类指标反映了地下水空间位置；第二类指标则综合反映了地下水质量状况；第三类指标属于地下水环境指标；第四类指标是人为引起的地下水化学成分；第五类指标包括地下水主要离子成分。地下水化学指标，包括地下水主要离子成分和人为污染化学成分聚类分析结果如图 4.1 所示。

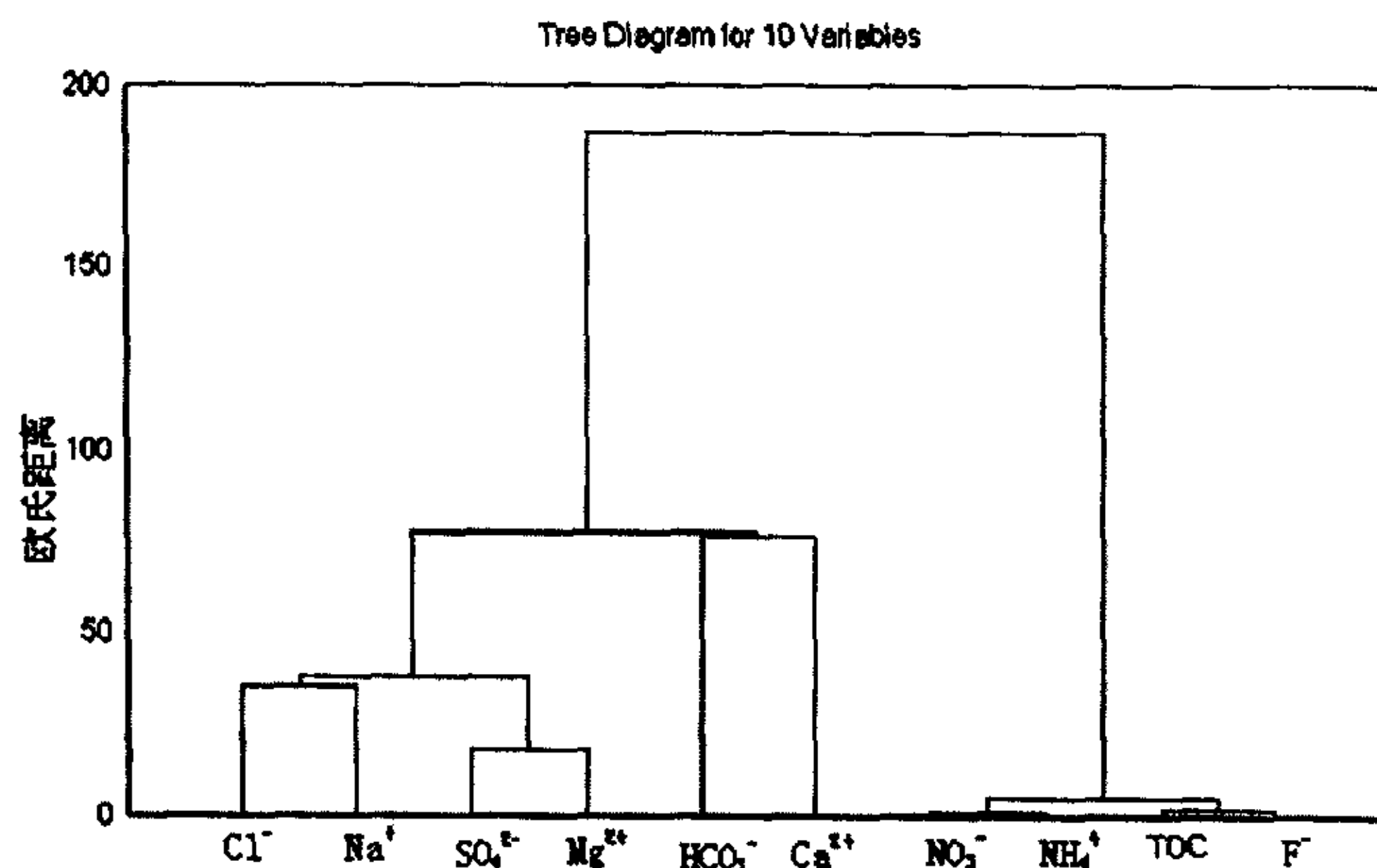


图 4.1 地下水化学成分指标聚类分析

Figure 4.1 The chemical composition analysis of clustering of groundwater

图 4.1 结果显示，地下水主要化学成分指标 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ （含 K^+ ）、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 F^- 和 TOC 基本按照化学成分来源聚类，即自然形成的化学成分和人类活动影响下形成的化学成分两大类。其中自然形成化学成分聚类结果表明 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 、 Na^+ 与 Cl^- 之间距离最近。由此可以推断，地下水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要以 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 形式存在，可能来自碳酸岩矿物的溶解；于此类推，其他自然形成离子可能也与 MgSO_4 和 NaCl 等岩盐溶解有关；地下水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 类间距离最近，这是因为它们来源相同，而且 NH_4^+ 可以向 NO_3^- 转化。

根据以上分类我们还可以对研究区域地下水化学分析结果进一步分类，为研究地下水环境演变提供科学依据。

第五章 地下水流路径确定

地下水的化学成分是地下水与环境（自然地理、地质背景以及人类活动）长期相互作用的产物。一个地区地下水的化学面貌，反映了该地区地下水的历史演变。研究地下水的化学成分可以帮助我们回溯一个地区的水文地质历史，阐明地下水的起源与形成。

5.1 地下水位高程区域变化

地下水化学成分主要来自流动过程中对流经岩土溶滤。其他条件相同时，地下水在岩层滞留的时间越长，从周围岩土溶滤获得的组分就越多。局部流动系统的水，流程短，流速快，地下水化学成分相应地比较简单，矿化度低。区域流动系统的水，流程长，流速慢，接触的岩层多，成分复杂，矿化度也高。为比较研究区域内不同采样点地下水化学成分，必须确定地下水流程路径。地下水径流方向一般根据地下水位高程确定水势图，研究区域地下水位高程等高线如图 4.2 所示。

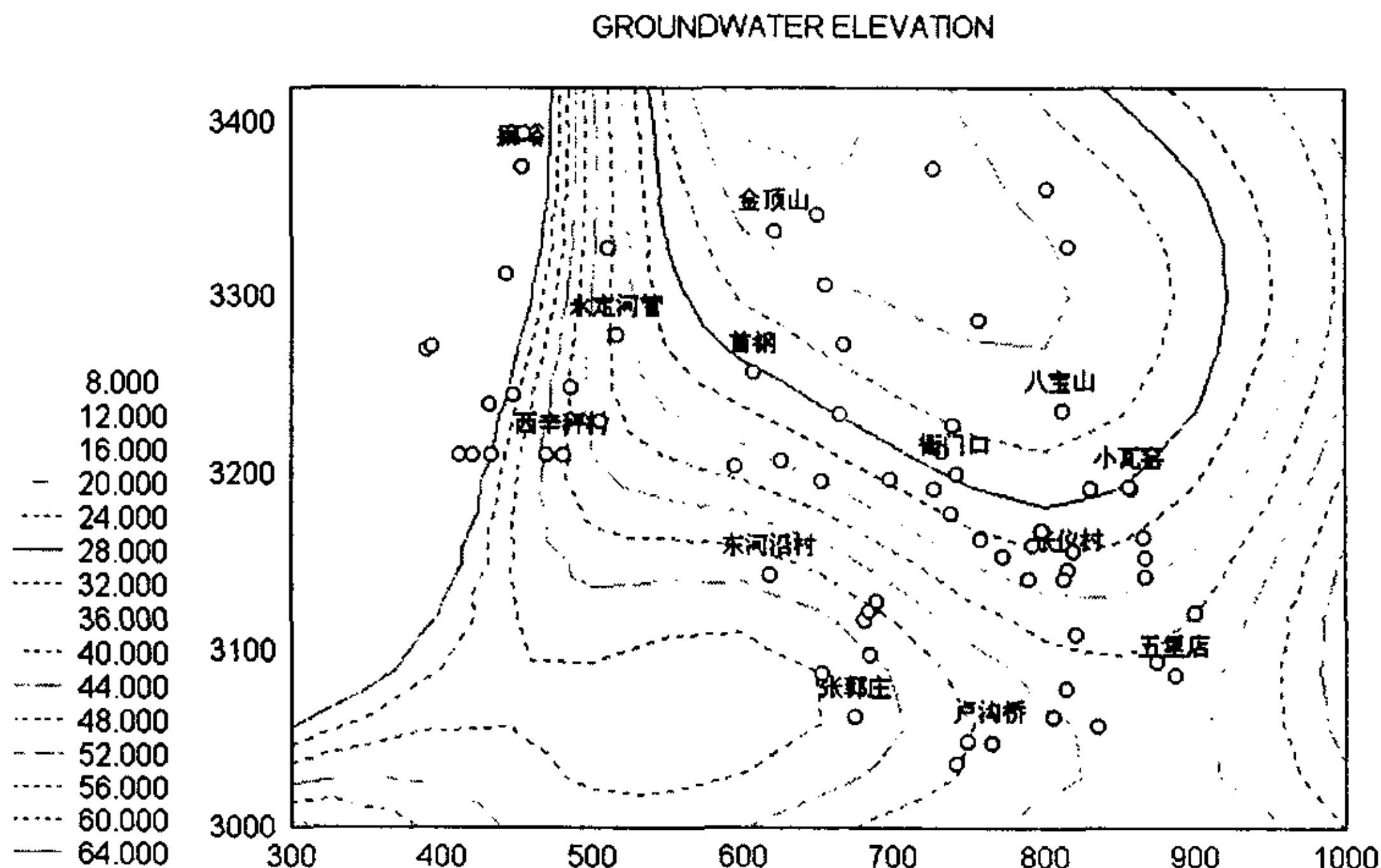


图 5.1 研究区域地下水位高程等高线
Figure 5.1 The elevation of groundwater

图 5.1 结果显示, 研究区域地下水位势与地形基本一致, 即西南高东北低。由此决定研究区域地下水径流方向也自西向东和南流。其中五里坨区地下水自北向南流向永定镇转东流向石景山; 卢沟桥西张郭庄地下水自西向东偏北流向永定河河床以东衙门口、张仪村和大瓦窑等地。因此, 研究区域地下水可能属于两个流动系统, 其中水化学可能存在一定差异。

5.2 不同地区 TDS 分析

地下水流动系统的不同部位, 由于流速与流程对水质的控制作用, 显示出很好的地带性。在地形复杂, 同时出现局部、中间、区域流动系统时, 以垂直分带为主。地形变化简单, 只出现区域流动系统时, 则主要呈水平分带。传统的水文地质观点把一个含水层看作一个单一的水动力场与水化学场。认为同一含水层的水质比较一致, 根据水质可以判断地下水是否属于同一含水层。其实, 同一含水层或含水系统中的水, 可以分属于不同的流动系统或不同级次流动系统, 水动力特征不同, 水化学特征自然也就不同。

研究区域春季地下水 TDS 空间分布 (图 5.2) 与地下水位高程等值线图 (图 5.1) 可以确定地下水流径流大致方向, 即地下水径流自地下水面高程高处向低

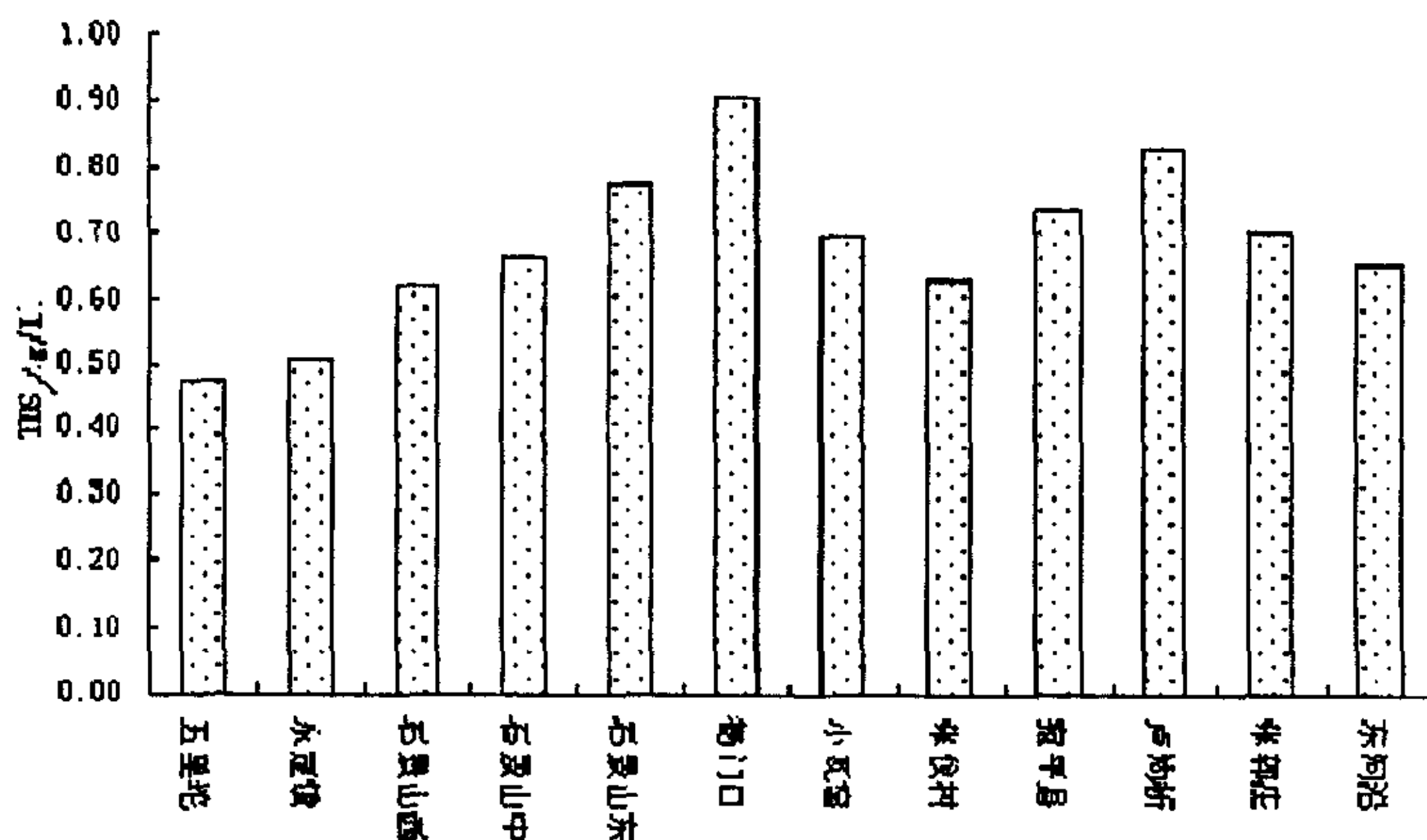


图 5.2 不同区位 TDS 均值变化

Figure 5.2 The comparison of TDS average value of groundwater

处流, 而且地下水流程越长地下水矿化度一般也越高, 因此以上分析结果大致可

以确定地下水径流方向大致是 NW-SE 方向。但是地下水具体的演化方向判断仍需要通过地下水化学成分指标来加以推断。根据地下水化学指标聚类分析结果可以看出, TDS 是综合反映地下水化学成分的最综合的指标。因此, 以下首先根据不同区域地下水 TDS 初步推断地下水化学演化方向。不同区位地下水 TDS 平均含量如图 5.2 所示。其中五里坨 TDS 均值包括五里坨、煤校浅、折返段、粉煤灰厂 4 个采样点数据; 永定镇 TDS 均值包括坝房子、冯村、曹各庄、疗养院、增圣庄、栗圆村、栗圆村小学、党校、西辛秤西、西辛秤村和东辛秤 11 个采样点数据; 石景山西 TDS 均值永定河管理处、燕山水泥厂、燕山水泥厂宿舍、养马厂、永定化工厂、首钢东门和水屯北 7 个采样点数据; 石景山中 TDS 均值包括金顶山、北辛安、古城南路和特钢 4 个采样点数据; 石景山东 TDS 均值包括林业局家属院、杏石口和锦绣大地北区 3 个采样点数据; 衙门口 TDS 包括衙门口西街、衙门口南、衙门口村南菜地、衙门口三号桥果园、煤气储配厂、景阳公司和衙门口北 7 个采样点数据; 小瓦窑 TDS 均值包括鲁谷、三顷地、四顷地、小瓦窑、吴家村、梅市口、西南坟和西南坟菜地 8 个采样点数据; 张仪村 TDS 均值包括张仪村、张仪村西大棚、张仪村西果园、张仪村南果园、张仪村金达储运公司、张仪村北屠宰场和张仪村村部 7 个采样点数据; 宛平县 TDS 均值包括大瓦窑木材厂、大瓦窑北、宛平县盲文印刷厂、东关、五里店北和五里店南 6 个采样点数据; 卢沟桥 TDS 均值包括卢沟桥西街东、卢沟桥中和卢沟桥西街西 3 个采样点数据; 张郭庄 TDS 均值包括张郭庄一队、张郭庄二队和张郭庄三队 3 个采样点数据; 东河沿 TDS 均值包括东河沿、东河沿菜地、东河沿采砂厂老井和东河沿村 4 个采样点数据。

图 5.2 结果显示, 自五里坨向南到永定镇, 再往东到石景山一线地下水 TDS 含量逐渐增加; 另外, 从石景山西和石景山中往东南方向的衙门口 TDS 相对高于前者; 结合图 5.1 地下水面高程等值线图可以推断: 永定河冲积扇顶部地下水流路径是自五里坨向南流到永定镇, 再折向东偏北流往石景山, 自西往东, 直到永定河引水渠的杏石口; 另外根据八宝山基岩隆起基本地形, 可以进一步确认, 自永定镇转向东的地下水径流在水屯分为两条支流, 其一如上所述, 称为石景山支流; 另一支流则向东及偏南沿新南干渠方向流向衙门口和小瓦窑一带, 该支流可以称为水屯支流。

结合图 3.1、图 5.1 和图 5.2 可以看出, 卢沟桥西张郭庄和东河沿等地地下

水位明显高于东部地区，在加上卧龙岗的阻隔，使得永定河冲积扇顶部地下水无法与之交换，因此该区域地下水与永定镇明显不处于同一含水层，因此其地下水流系统也迥然不同，由于其集水区域始于辛庄，暂称辛庄支流；该区域地下水流方向基本依地形自西向东流，最后可能在张仪村一带与水屯支流混合。混合后可能依地形向东或向南流向小屯和大瓦窑一带。基于以上的假设，以下通过地下水化学成分变化加以推演。

5.3 比例系数分析

在地下水化学成分中，各种组分之间的含量比例系数常常被用来研究某些水文地球化学问题，因为不同成因或不同条件下形成的地下水，某些比例系数在数值上有比较明显的差异，因此可以利用这些系数判断地下水的成因。以下分别计算地下水不同流段 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 、 Na^+/Cl^- 和 Cl^-/F^- 浓度比值。结果见表 5.1

表 5.1 不同离子间浓度比值

Table 5.1 The concentration ratios of different ions

	$\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	Na^+/Cl^-	Cl^-/F^-
五里坨	0.50	0.63	0.64	0.39	0.98	1.28	3.80
永定镇	0.50	0.48	0.48	0.51	1.00	0.95	5.42
石景山西	0.85	0.82	1.00	0.61	1.31	1.17	4.86
石景山中	0.66	0.64	0.80	0.54	1.16	1.21	7.08
石景山东	0.65	0.61	0.65	0.63	1.09	1.01	8.59
衙门口	1.28	0.84	0.99	1.15	2.78	0.77	14.32
小瓦窑	1.04	0.86	1.19	0.75	1.47	1.14	8.13
张仪村	1.00	0.89	1.40	0.65	1.25	1.40	4.72
宛平县	1.10	0.91	1.13	0.89	1.40	1.04	6.52
卢沟桥	0.72	0.68	1.05	0.57	0.87	1.45	5.99
张郭庄	0.49	0.68	0.67	0.39	0.89	1.36	5.62
东河沿	0.63	0.72	0.73	0.53	0.90	1.15	6.48

由于 Cl^- 在地下水中是最稳定的元素，它一般随着矿化度的增加而增加，而地下水中 Cl^- 主要来自盐矿的溶解，因此 Cl^- 含量在一定程度代表了地下水淋溶作用的强弱；地下水中一般都含有 F^- ，但是含量远小于 Cl^- ，自然条件下，地下水中 F^- 含量一般变化不大，表 5.1 计算结果也表明了研究区域地下水 F^- 含量分布比较一致。因此，本研究选择 Na^+/Cl^- 与 Cl^-/F^- 即作为评价盐份淋溶与积累强度的指标。表 5.1 计算结果表明，永定河冲积扇顶部地下水 Cl^-/F^- 比值随着流程延长而增大，而 Na^+/Cl^- 则有降低趋势。说明石景山支流地下水 Cl^- 相对富集；与石景山支流比

较, 小屯支流 Cl^- 富集现象更加明显。相比之下, 与衙门口相邻的小瓦窑、张仪村和东河沿三个采样区地下水 Cl^-/F^- 和 Na^+/Cl^- 比值比较相似, 因此, 他们来自同一地下水流系统可能性更大。

重碳酸钙水是低矿化水的普遍特征, 因此 Ca^{2+} 是弱矿化水中的主要阳离子, 而 Cl^- 通常在滞缓的水动力带中相对富集, 因此一般以 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 来划分地下水动力特征。表 5.1 计算结果表明, 不同区位地下水 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 有明显差异, 其中五里坨、永定镇和石景山区地下水 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 都小于其他区位, 说明石景山支流畅通; 石景山以南平原地区地下水 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值普遍较高, 说明该区域地下水流动滞缓, 可能与八宝山基岩隆起阻隔有关。衙门口地下水 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 比值最高, 一方面可能与该地区地下水 Cl^- 相对富集有关, 另一方面可反映了该区域地下水流通不畅; 与此不同, 卢沟桥以西张郭庄和东河沿地下水 $\text{Cl}^-/\text{Ca}^{2+}$ 值也比较低, 说明地下水支流畅通, 同时也证明了它们与石景山支流处于不同含水层, 而张郭庄和东河沿处于该区域含水层补给区, 地下水流动较快。

由于 Ca^{2+} 在低矿化度水中通常占优势, 随着矿化度之增高, 水中 Mg^{2+} 含量也相应地增加, 如果矿化度继续增加, 水中 Na^+ 在水中逐渐取代优势地位。一般以 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值表征地下水质演化过程及矿化度。表 5.1 计算结果表明, 总体上山前冲积扇地下水到平原过程 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 逐渐增加, 例如永定镇到石景山区, 以及卢沟桥西山前冲积扇到卢沟桥和张仪村地下水 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 逐渐增高, 这与 TDS 变化趋势一致; $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值变化趋势与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 基本一致。值得注意的是石景山区地下水 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值自西向东逐渐降低, 这种变化可能与 Ca^{2+} 沉淀有关。另外, 五里坨地下水 $\gamma \text{Mg}^{2+}/\gamma \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值明显不同, 由此可以推断, 五里坨地下水与永定镇可能由于永定河河床与石景山阻隔处于不同含水层。另外, 永定河河床东岸石景山西地下水可能明显受到河床地表回灌水以及蒸发浓缩等地球化学过程的影响, 致使石景山西地下水表现出很大的突变性。

阴离子组成在一定程度上反映地下水化学类型, 因此常把 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值作为反映阴离子演化过程及组分配比变化的水文地球化学参数。表 5.1 计算结果表明, 永定河冲积扇顶部地下水 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 比值自五里坨到永定镇以及石景山区逐渐降低, 说明地下水演化方向与此路径相同, 石景山区西地下水可能与上述原因有关, 地下水 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 比值局部升高。卢沟桥西张郭庄和东河沿地下水 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 比值自西向东逐渐升高, 即地下水随着流程增加矿化度增加。但是,

卢沟桥地下水 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 比值局部升高可能与河床局部蒸发浓缩作用有关。

就 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值而言, 永定河冲积扇顶部地下水含水层, 包括五里坨、永定镇和石景山区地下水 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值有逐渐升高趋势, 变化范围在 1.0 左右。石景山西地下水 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 局部增高, 可能与永定河河床影响有关。卢沟桥西山前冲积扇地下水 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值明显低于平原地区, 说明卢沟桥区域含水层地下水自西向东方向演化。永定河冲积扇顶部和卢沟桥附近平原地区地下水 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值明显不同, 由此可以推断, 研究区域基本属于两个不同含水层。

第六章 地下水氮污染分析

地下水氮污染主要来自人类活动污染源,如生活污水排放和工业废水排放等。北京自辽代在此建都以来,已有八百余年的历史,人类活动强烈影响水质,地下水氮素污染由来已久,而且随着现代农业的发展而发展。本节主要调查永定河冲洪积扇三家店—卢沟桥段潜层地下水水质和氮形态分布基础上,通过阐明永定河冲洪积扇顶部潜层地下水氮素污染现状及分布规律,为北京城区供水和地下水污染控制提供科学依据。

6.1 氮污染现状

地下水中溶解氮除了 NO_3^- -N 外,还有氨氮 (NH_4^+ -N)、 NO_2^- -N 和 有机氮。为阐明地下水中不同氮形态污染现状,分别测定地下水中总氮素、 NO_3^- -N 外、 NO_2^- -N、氨氮 (NH_4^+ -N) 和凯氏氮,其中有机氮以凯氏氮和氨氮差值表示。区域地下水各种氮形态分析结果及其地下水水质标准如表 6.1

表 6.1 地下水各种氮形态分析结果及其地下水水质标准
Table 6.1 the analyses results and standard of nitrogen in groundwater

氮形态	N	样本数	均值	中位数	极小值	极大值	标准差	偏态	峰态	地下水水质标准(GB/T 14848-93)/mg/L				
			/mg/L	/mg/L	/mg/L	/mg/L	/mg/L	系数	系数	I	II	III	IV	VI
NO_3^-		139	11.41	10.42	0.1	38.2	7	1.19	2.1	<2	<5	<20	<30	>30
NO_2^-		49	0.019	0.016	0.0	0.05	0.01	0.79	-0.09	<0.001	<0.01	<0.02	<0.1	0.1
NH_4^+		131	0.36	0.27	0.01	2.75	0.36	3.31	16.62	<0.002	<0.02	<0.2	<0.5	>0.5

表 6.1 统计结果表明,地下水氮素形态组成以硝酸盐氮为主,其次是氨氮,有机氮和亚硝酸盐氮含量很少,大部分地下水未检出有机氮和亚硝酸氮素。其中地下水中硝酸盐氮平均含量达到 III 类水质标准;氨氮含量达到 IV 类水质标准。因此,地下水氮污染主要为氨氮污染。地下水硝酸盐氮含量主要集中在 5.0—20.0mg/L 之间,分布频率 72.7%; 小于 5.0mg/L 分布频率为 10.8%; 20.0~30.0mg/L 分布频率为 10.1%; 大于 30mg/L 分布频率 6.4。可见,区域地下水硝酸盐氮大部分在 III 类水质以下。地下水氨氮含量小于 0.5mg/L 分布频率占 74.1%,即总体上达到 IV 类地下水;地下水氨氮超标(>0.5mg/L)分布频率占 25.9%。与硝酸盐氮比较,地下水氨氮污染更为严重。

以上分析结果表明,地下水中氮素形态以硝酸盐氮和氨氮为主,有机氮和亚硝

酸盐氮所占比例很低，平均含量分别为 0.12 mg/L 和 0.02mg/L，多数地下水未检出有机氮和亚硝酸盐氮。其中硝酸盐氮含量一般为 5.0—20.0 mg/L，为 III 类水；地下水氨氮含量一般小于 0.5 mg/L，即 IV 类水。总体上，地下水氨氮污染比硝酸盐氮更为严重。

6.2 地下水氮的区域分布

6.2.1 地下水硝酸盐氮区域分布

地下水采样点主要分布在永定河冲洪积扇顶部，不仅包括冲积扇平原，还包括山前洪积扇和永定河河床等水文地质条件。为比较不同区域地下水硝酸盐氮分布差异，分别对区域变量进行插值计算，并绘制等值线图，结果如图所示。

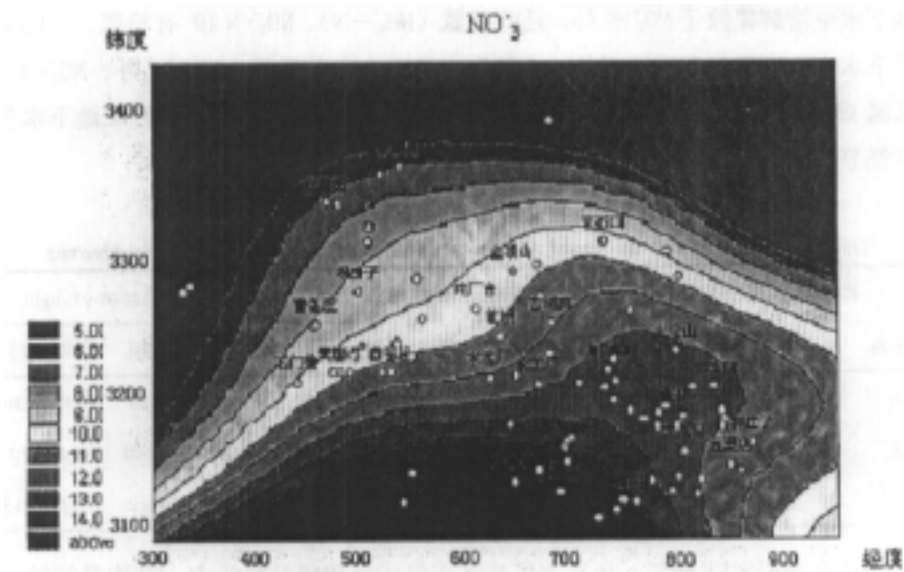


图 6.1 地下水硝酸盐氮含量分布
Figure6.1 The NO₃ distribution of groundwater

图 6.1 结果显示，地下水硝酸盐氮含量还沿着永定河冲洪积扇展开方向逐渐增加，即冲洪积扇顶部，如五里坨和永定镇等，地下水硝酸盐氮含量相对较低，冲洪积扇平原，如小瓦窑和五里店等，地下水硝酸盐含量相对较高。这种变化可能与水文地质条件差异有关，其中冲洪积扇顶部含水层主要以砂卵砾石为主，透气性好，易保持氧化环境，有利于反硝化；扇前缘堆积物颗粒逐渐变细，有利于硝化作用；也可能与该区域是农田比较多施肥等农业活动有关。

由此可见，浅层地下水硝酸盐氮分布主要受地下水埋藏深度和含水层岩性结

构等因素影响。其中，冲洪积扇顶部与河床阶地，如永定镇，含水层潜层岩性粗粒，透气性好，区域地下水硝酸盐氮含量相对较低，平均含量小于 12.0mg/L；山前洪积扇顶部地下水埋藏较深，地下水硝酸盐氮含量一般高于 18.0mg/L，并沿山前侧向径流方向逐渐减少。

6.2.3 地下水氨氮区域分布

地下水氨氮污染主要是人为污染，如生活污水和农田施肥等。

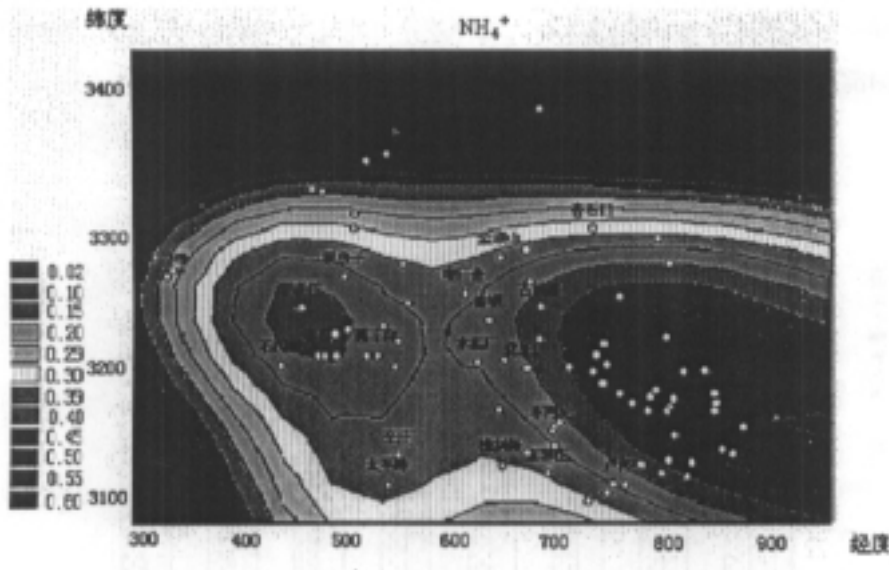


图 6.2 研究区域地下水氨氮分布
Figure 6.2 The NH₄⁺ distribution of groundwater

图 6.2 结果显示，研究区域浅层地下水氨氮分布与硝酸盐氮明显不同，山前冲洪积扇地下水氨氮含量明显低于河床阶地，并沿河床方向分别在永定镇和衙门口—郭庄子形成氨氮污染晕圈。其中永定河冲洪积扇顶部氨氮污染晕圈以坝房子为中心，氨氮含量大于 0.4mg/L，并沿下游方向逐渐降低；衙门口附近地下水氨氮含量最高，平均含量大于 0.5mg/L，山前冲洪积扇顶部地下水氨氮平均含量一般小于 0.2mg/L。综观地下水氨氮污染晕圈土地利用类型，均以农业用地为主，尤其以菜地为主。其中衙门口、郭庄子、小瓦窑和坝房子等都有大面积菜地。因此，地下水氨氮污染可能与菜地密集施肥有关。当然，水文地质条件差异也与氨氮污染有关，图 6.2 可以看出，氨氮污染主要分布在河床阶地等地质粗粒含水层，地下水埋藏也相对较浅，这些都有利于地表土壤氨氮向含水层迁移，从而增加地下水氨氮污染。

6.3 地下水氮污染季节变化

区域浅层地下水位主要受大气降水影响，最低水位一般雨季前5—7月，高水位出现在8月中旬及9月上旬。本研究分别于2001年4月和10月采集地下水样，分别代表枯水期和丰水期。地下水硝酸盐氮与氨氮含量变化如图6.3和图6.4。图6.3结果显示，山前冲洪积扇顶部地下水丰水期硝酸盐氮含量一般很低。例如，永定镇和张郭庄丰水期地下水硝酸盐氮含量分别为7.7mg/L和9.4mg/L，分别比枯水期减少29.0%和20.4%。这种差异可能与大气降水稀释有关；但冲洪积扇前沿则增加。

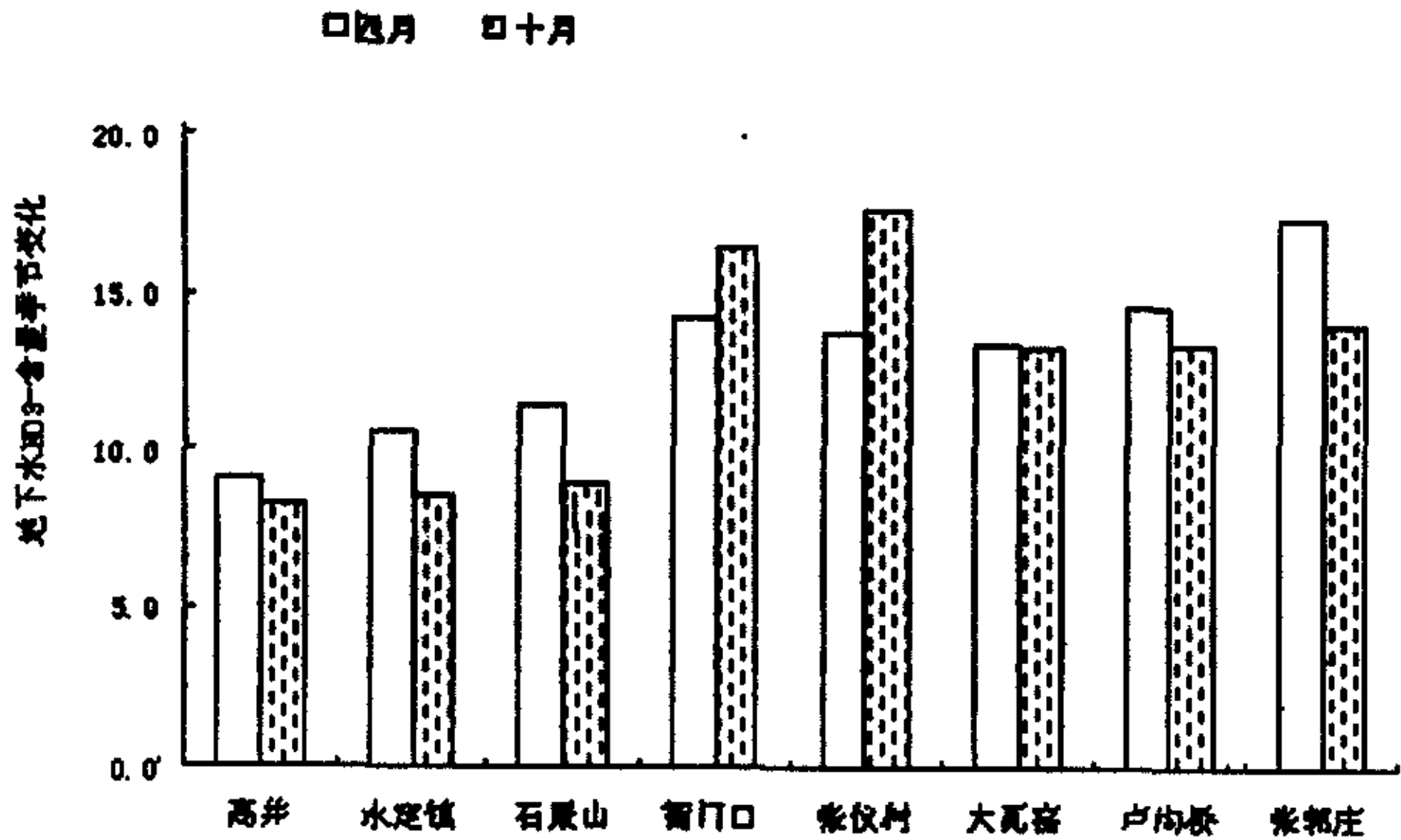


图 6.3 地下水硝酸盐氮含量季节变化
Figure6.3 The change of NO₃⁻ content in various seasons

例如，衙门口与张仪村丰水期地下水硝酸盐氮含量分别为14.9mg/L和15.1mg/L，分别比枯水期加21.5%和20.4%。这种差异可能与水文地质条件差异有关。

表 6.2 地下水硝酸盐氮含量季节变化
Table 6.2 The season variety of nitric salt in groundwater

采样地点	10月 NO ₃ -N /mg/L	4月 NO ₃ -N/mg/L
五里坨	4.2	3.9
煤校（浅）	2.2	2.7
折返段	9.0	6.4
粉煤灰厂	12.3	10.3
高井区平均值	9.3	7.3

冯村	9.6	8.8
曹各庄	9.8	8.8
疗养院	9.8	8.9
栗园村	12.6	6.1
栗园村小学	12.4	7.1
党校	11.4	7.8
西辛秤村	10.6	8.0
西辛秤(西)	10.4	8.7
东辛秤	15.4	11.7
增圣庄	13.7	5.0
坝房子	5.5	4.7
东西辛秤	11.0	7.7
北辛安	7.0	9.5
首钢东门	6.7	6.3
水屯北	7.7	4.5
古城南路	7.3	4.1
特钢	9.5	8.7
林业局家属院	18.3	15.0
金顶山	8.2	8.5
杏石口	16.0	11.0
锦绣大地果园南区	0.9	1.4
锦绣大地北区	7.9	5.1
永定化工厂	4.9	5.7
燕山水泥厂宿舍	7.2	1.3
养马厂	6.6	0.9
永定河管理处	6.6	3.4
首钢区平均值	7.6	5.7
八宝山	22.9	14.2
衙门口	32.3	35.8
衙门口南	5.5	7.2
衙门口村南菜地	7.2	32.0
景阳公司	30.8	35.5
衙门口西街	6.7	6.4
衙门口三号桥果园	17.7	16.7
衙门口区平均值	16.7	19.1
宛平县盲文印刷厂	11.9	9.1
卢沟桥西街东	16.7	10.1
卢沟桥西街	13.2	6.4
桥西佳加公司	24.5	15.2
卢沟桥大队(东关)	12.2	9.4
五里店	12.3	9.6
郭庄子	13.6	12.8

大瓦窑（木材厂）	8.6	8.4
大瓦窑北	8.1	8.1
张仪村	10.6	9.8
张仪村西大棚	13.6	8.5
张仪村西果园	7.2	6.9
张仪村南果园	6.1	6.0
张仪村金达储运公司	10.9	9.0
张仪村北屠宰场	8.9	7.7
张仪村村部	9.3	7.6
西南坟	11.4	8.2
西南坟菜地	11.4	8.3
四顷地	14.1	13.6
梅市口	14.1	8.5
小瓦窑	11.6	
吴家村	16.0	9.8
三顷地	14.2	
卢沟桥东平均值	12.2	9.4
张郭庄（一队）	30.6	21.4
张郭庄（二队）	17.2	10.6
张郭庄（三队）	18.0	7.3
东河沿	16.6	
东河沿菜地	10.4	8.6
东河沿采砂厂老井	11.6	7.0
东河沿村	17.2	9.0
卢沟桥西平均值	17.4	10.6

□四月 □十月

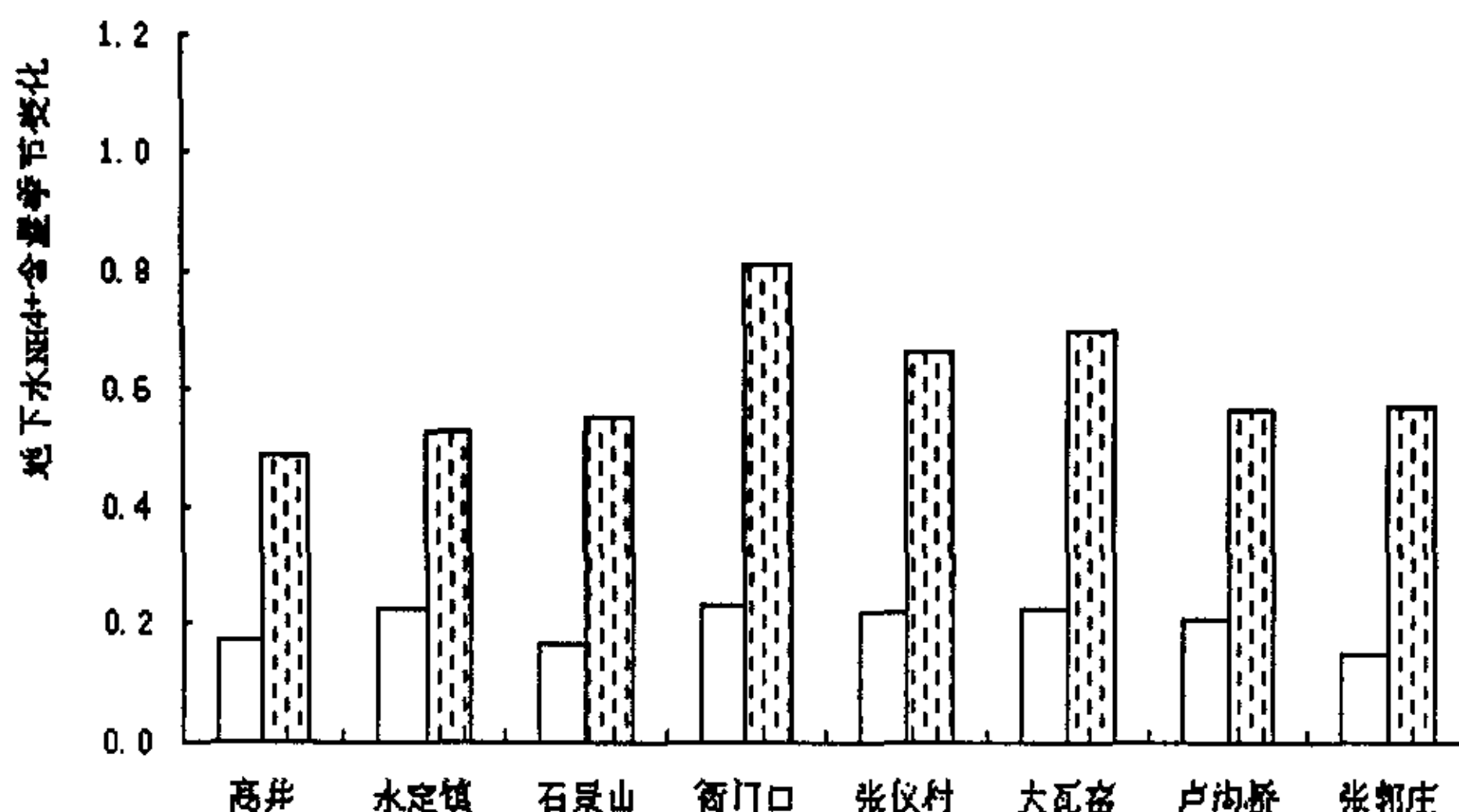


图 6.4 研究区域地下水氨氮含量季节变化

Figure 6.4 The change of NH_4^+ content in various seasons

图 6.4 结果显示, 研究区域浅层地下水丰水期氨氮含量急剧增加。例如, 五里坨、西辛秤、石景山、衙门口、张仪村和张郭庄丰水期氨氮平均含量依次为 0.48、0.52、0.55、0.71、0.70、和 0.56mg/L, 与枯水期比较, 增加了 2-3 倍。与地下水质量标准比较, 丰水期地下水氨氮污染更为严重, 超标检出率达 68.5%。这种差异可能与地表氮素随大气降水入渗有关。就不同区域地下水氨氮含量变化而言, 冲洪积扇扇前沿大于山前, 永定河河床下游大于上游, 与枯水期变化基本一致。

6.4 与其他水质指标关系

为比较地下水氮含量变化与其他化学指标相关性, 分别计算相关系数, 结果如表 6.2。

表 6.2 计算结果表明, 地下水硝酸盐氮含量与 TDS 及其主要离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 显著正相关, 与其他指标相关不显著。说明硝酸盐氮与地下水形成过程相关, 即随着 TDS 增加, NO_3^- -N 也增加。与硝酸盐氮主要不与人类活动有关, 地下水氨氮含量除了与温度相关达到显著水平外, 与其他所有指标相关都不显著, 说明地下水氨氮素污染来源主要与人类活动有关。与自然因素相关不密切。

表 6.2 地下水氮含量变化与其他化学指标相关系数

Table 6.2 The nitrogen content variety in groundwater and other chemical relationship coefficient

	PH	埋深	温度	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
NO ₃ ⁻	-0.48	0.45	-0.07	0.52	0.58	0.61	0.19	0.82	0.28	0.14
NH ₄ ⁺	-0.12	-0.4	0.5	0.21	-0.06	-0.09	0.31	-0.31	0.36	0.41
NO ₂ ⁻	-0.04	0.08	0.06	-0.08	-0.09	-0.11	0.09	-0.05	0.05	-0.03
有机氮	-0.25	0.29	0.34	0.47	0.13	0.17	0.39	0.43	0.32	0.32

第七章 结论

1. 地下水位高程西高东低, 并自上游向下游逐渐降低。由于过度超采地下水, 分别在永定镇和卢沟桥附近形成两个地下水漏斗区, 平均水位分别为 46.8 米和 34.2 米。丰水期山前地下水位高于枯水期 3~4 米, 平原地区地下水年变化小于 1 米。
2. 地下水总溶解固体含量在 88.0~833.0mg/L 之间, 秋季地下水 TDS 低于春季。就主要离子组成而言, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 其次是 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- , 阳离子含量以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, Mg^{2+} 次之, K^+ 含量最少。除了主要离子外, 地下水中还含有一定量的溶解性二氧化硅, Sr 、 Ba^{2+} 、 F^- 和氨氮, 它们远远低于主要离子含量。
3. 聚类分析表明, 地下水基本化学成分可以分为自然成因和人为成因分两类, 其中自然成因包括 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 Cl^- 组分, 人为成因包括 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 F^- 和 TOC 组分。
4. 区域地下水 pH 变化在 7.19~8.21 之间, 平均 pH 值 7.70。其中石景山区地下水 pH 明显低于其他区域, 并在工业区形成一个低 pH 晕圈, 最低 pH 值仅 7.19, 平均 pH 为 7.47。
5. 地下水中氮素形态以硝酸盐氮和氨氮为主, 有机氮和亚硝酸盐氮所占比例很低, 平均含量分别为 0.12mg/L 和 0.02mg/L。其中硝酸盐氮含量一般为 5.0~20.0mg/L, 为 III 类水; 地下水氨氮含量一般在 0.2~0.5mg/L, 即 IV 类水。总体上, 地下水氨氮污染比硝酸盐氮污染更为严重。
6. 就不同区域地下水氨氮含量变化而言, 平原地区大于山前, 永定河河床下游大于上游, 与枯水期变化基本一致。地下水氨氮含量除了温度相关达到显著水平外, 与其他所有指标相关都不显著, 说明该地区的地下水氨氮素污染源主要与人类活动有关。
7. 根据研究区域氮污染的特点, 你采取相应的对策。市郊农村区对农田施肥应采取科学施肥, 提高肥料的利用率, 尽量减少氮在土壤中的积累量; 同时不用或减少污水灌溉, 以减少污水中氮素对地下水的影响。

参考文献

1. 谢春红, 孙慧橙, 张天岭. 化椭圆型方程为椭圆型方程的一种迭代法及其有限无近似解[J], 南京大学学报 (自然科学版), 1978.1978 (4)
2. 陈国阶. 含氟污水灌田试验的探讨[J], 环境科学, 北京:1979, 第二期:13~17.
3. 薛禹群, 谢春红. 水文地质学的数值法[M], 北京:煤炭工业出版社,1980
4. 气象总局. 气象科学研究院中国近 500 年旱涝分布图集[M], 北京:地图出版社, 1981
5. 李鄂荣. 我国历史上的土壤盐碱改良[J], 水文地质工程地质,1981, 第一期:50~52
6. 清芝. 天津市地面沉降勘察工作的初步认识[J], 天津地质,1981, 第一期:1~19
7. 薛禹群, 谢春红, 戴水汉. 多个含水层中渗流问题的有限元分析[J], 见地质矿产部水文地质工程地质研究所主编, 地下水资源评价理论与方法研究[J], 北京:地质出版社, 1982, 420~425
8. 余大富. 土壤氟污染及其危害[J], 环境科学, 1982, 3 (6): 70~74
9. 何群, 陈家坊. 土壤胶体中的污染物的初步研究[J], 土壤学报, 1984, 21 (4): 402~408
10. 邵宗臣. 几种氧化铁的离子吸附特性研究[J], 土壤学报, 1984, 21 (2): 153~162
11. Bear j. 地下水水力学 (中译本) [J], 北京:地质出版社, 1985
12. 张玉晨. 北京市平原区地下水水质概况[J], 北京地质, 2000, 1: 8-18
13. 朱济成. 关于地下水硝酸盐污染原因的探讨[J], 水文地质工程地质,1995, 2: 20-26
14. 朱济成. 北京城市地下水资源问题及其对策探讨[J] 水环境污染与保护,1992, 3: 12-18
15. 朱南文. 饮用水生物脱氮技术现状[J], 水处理技术, 1999, 25(4): 214-219
16. 张超. 水资源系统分析及应用[M], 北京:清华大学出版社,1998, 21-87
17. 谢春红. 水文地质学的数值法[M], 北京:煤炭工业出版社,1980, 35-89
18. 北京市水文公司. 北京市平原区水污染监测报告[J], 1982, 4 (4): 60-70
19. 北京局 101 大队. 门头沟区沿河城官厅间地质报告[J], 1958, 3 (10): 76-79
20. 北师大地理系. 北京西郊永定河及永定河引水渠酚、氰、汞、砷、铬污染状况的研究[J], 1999, 2:17-24

21. 张光辉. 华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J], 水科学进展, 2000,11:415-417
22. 吕金波. 从永定河的形成与发展看北京西山新生代的古地理变迁[J], 北京地质, 1999,2:13-18
23. 江德爱. 对圆明园农业区地下水氮污染状况的调查和探讨[J], 环境科学, 2000,4:27-31
24. 陈培钧. 北京地下水资源与首都持续发展[J],北京地质,1999,4:21-34
25. 刘吉祯,李容全.地质学基础[M], 北京:北京师范大学出版社,1988,78-104
26. 周泽松.水文与地貌[M],上海:华东师范大学出版社,1990,140-154
27. 方开泰.聚类分析[M],北京:地质出版社,1982,26-105
28. 刘昌明. 第六次全国水文学术会议论文集[J], 北京:科学出版社,1997,120-146
29. 夏邦栋..普通地质学[M], 北京:地质出版社,1984,209-225
30. 中国地质学会 2000 年中国地质研究会.中国地质工作发展战略[J], 北京:地质出版社,2000,150-163
31. 陈家梅.北京西郊地下水氮污染与农田施肥和污水灌溉关系的探讨[J], 环境科学 1997,5:46-49
32. Agrawal G D. Diffuse agricultural water pollution in India [J], Water Science and Technology, 1999,39(3):33-47
33. Arnold S D, Meister E A. Dairy feedlot contributions to groundwater contamination-A preliminary study in New Mexico [J], Journal of Environmental Health, 1999,62(2):16-19
34. Barrett R J. Distribution of nitrate-N concentrations in groundwater beneath intensively grazed pastureland and in the Ngatarawa Valley, Hawkes Bay [J], Journal of Hydrology, 1980,19(2):94-105
35. Burkart M R, Kolpin D W. Assessing groundwater vulnerability to agrochemical contamination in the Midwest U.S.A. [J], Water Science and Technology, 1999,39(3):103-112
36. Creed I F, Band L E. Exploring functional similarity in the export of nitrate-N from forested catchments [J], Water Resources Research, 1998,34(11):3079-3093
37. Greene E A, Passarella G. Spatial and temporal study of nitrate concentration in groundwater by means of coregionalization [J], Environmental Geology, 36(3-4):285-295
38. Elowson S. Willow as a vegetation filter for cleaning of polluted drainage water

- from agricultural land [J], Biomass and Bioenergy, 1999, 18(2): 191-192
39. Fuest S, Berlekamp J. Risk hazard mapping of groundwater contamination using long-term monitoring data of shallow drinking water wells [J], Journal of Hazardous Material, 1988, 61(1-3): 197-202
40. Gusman A J, Marino M A. Analytical modeling of nitrogen dynamics in soils and groundwater [J], Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(6): 330-337
41. Hamza M S, Aly A I M. Groundwater recharge and pollution in Wadinaturn [J], Egypt. International Journal of Water Resources Development, 1984, 2(1): 39-44
42. Keeny D. Source of nitrate to groundwater [J], CRC Critical Review in Environment Control, 1986, 16(3), 257-267
43. Maticic B. The impact of agriculture on ground water quality in Slovenia: Standards and strategy [J], Agricultural Water Management, 1999, 40(2-3): 235-247
44. Melloul A J, Collin M. A proposed index for aquifer water-quality assessment: The case of Israel's Sharon region [J], Journal of Environmental Management, 1998, 54(2): 131-142
45. Poe G L. Valuation of groundwater quality using a contingent valuation-damage function approach [J], Water Resources Research, 1998, 34(12): 215-220

致 谢

本论文是在朱龙教授的推荐下到中国科学院环境与生态中心完成的。本论文的选题、实验方案的确定、实验工作的进行、仪器的改造到最后论文的完成,其中每一点儿进步的取得,无不浸透他的心血,他在学业、生活上给予了慈父般的支持、关怀和教诲,同时也学到了许多做人的道理,而且必将受益终生。

另外特别感谢苏永渤,王林山等老师,他们给我的论文进行了细心的指导和无私的帮助,他丰富的学识,严谨求实的治学作风,无私奉献的高尚品德,以及不畏艰难,勇攀高峰的乐观精神,使我不仅在学业上有所启发,在此特向他们致以万分的感激。

同时也特别感谢宋强,王海燕,苑宝玲等博士与杜轶,赵敬棋,等同学,他们在论文的整理和完善过程中给予了热情的帮助。

最后对所有评审本论文和参加论文答辩的专家教授致以诚挚的敬意和衷心的感谢。

白雪峰

2003.1