

1

自然地理与
水文地质

宁夏引黄灌区包括青铜峡灌区和卫宁灌区两部分，在地质构造上分别隶属于银川平原和卫宁平原，其中青铜峡灌区面积 7061km^2 （包括倾斜平原），约占引黄灌区总面积 7983km^2 的 88.5%，构成宁夏引黄灌区的主体，是本书论述的范围。

1.1 自然地理

银川平原南起青铜峡，北止石嘴山，西依贺兰山，东邻鄂尔多斯台地。南北长约 160km ，东西宽 $40\sim 50\text{km}$ ，面积 7998km^2 。海拔 $1100\sim 1200\text{m}$ ，是宁夏地势最低之处。在灌溉区划上称为青铜峡灌区，习惯上以黄河为界，将西部称为河西灌区，东部称为河东灌区。在河西灌区，从南向北由于水文地质条件差异导致显著的自然景观差异，又以永宁县北部 4 乡为界，永宁县北部 4 乡及其以北谓之银北灌区，以南谓之银南灌区。在行政区划上银川平原包括青铜峡市、吴忠市、灵武市、永宁县、银川市、贺兰县、平罗县、陶乐县、惠农县和石嘴山市。

1.1.1 地形地貌

银川平原自西至东由贺兰山山前洪积倾斜平原、黄河冲洪积、冲湖积平原组成。西部贺兰山洪积倾斜平原呈南宽北窄的长条带状分布在贺兰山地与冲积平原之间，由新老洪积扇组成，宽 $8\sim 15\text{km}$ ，按地形和岩性可划分为洪积扇砾质带和扇前缘砂土细粒带两部分。前者由块石、碎石及砂砾石物质组成，地面坎坷不平，土层浅薄，植被稀疏，地面标高 $1150\sim 1500\text{m}$ ，坡降为 $1/40$ ，坡度为 $5^\circ\sim 7^\circ$ ；后者由砂粘土、粘砂土夹少量薄层砂层物质

组成,地面标高 1110~1150m,坡降为 1/100~1/50。中部黄河冲洪积平原地势开阔平坦,是山区洪水流与黄河交错堆积而成,地面标高 1090~1110m,地势自西南向东北呈微倾斜,坡降为 1/4000~1/8000,土地肥沃,利于灌溉和垦殖,洼地多成湖泊,其北部有成片的盐碱荒地分布。东部黄河冲湖积平原,由黄河多次摆动改道而产生的河湖共同堆积而成,宽 10~30km,地面坡度为 1/2500~1/2000,标高 1100~1130m,沟渠纵横。

1.1.2 气候

灌区地处内陆,位于我国季风气候区的西缘,冬季受蒙古高压控制,为寒冷气流南下之要冲,而夏季处在东南季风西行的末梢,形成了较典型的中温带干旱大陆性气候。其基本特点是春暖快,夏热短,秋凉早,冬寒长;干旱少雨,日照充足,蒸发强烈,风大沙多。多年平均气温 8℃,多年平均降水 180mm,多年平均水面蒸发量(E601) 1176mm。降雨量集中于 7~9 月,占全年降水量的 70%~80%,干旱指数为 6.5。冻土最大深度为 103cm,冻期长达 191d,无霜期 159d,风向以偏北风为主,日照率达 50%~80%。

1.1.3 水文

流经本区的主要河流为黄河,沿银川平原的东缘自南向北流动至石嘴山市头道坎北麻黄沟出境,多年平均流量 1030m³/s,过境水量约 325 亿 m³,水源充足,水质好,是本区灌溉用水的主要水源。

由于黄河水流平缓,引水方便。自秦汉以来,平原区内先后修建了秦渠、汉渠、汉延渠、唐徕渠、惠农渠、西干渠以及东干渠等(图 1.1),沟渠纵横交错。从 20 世纪 80 年代末起年引水量逾 60 亿 m³,90 年代末年引水量高达约 67 亿 m³,灌溉农田约 30 万 hm²。渠道每年 4 月下旬春灌放水,至 9 月下旬停水,10 月下旬至 11 月中旬再次放水冬灌。灌溉余水部分入渗补给地下水,部分流入排水沟,最后回归黄河。

区内 10 多条排水干沟(图 1.2),90 年代年排水量超过 30 亿 m³,最高达 40 多亿 m³。

区内湖沼密布,按其成因类型分为两大类:一类是故河道型湖泊,由黄河改道发育而成,具有明显的牛轭湖性质,多沿黄河故道呈条带状分布;另一类是扇前或扇间洼地型湖泊,湖型受洼地形态控制,呈不规则状。

1.2 地质构造

银川平原在构造上与鄂尔多斯台地西缘褶皱带相接,隶属于贺兰山断褶带的次级构造,是新生代形成的山前拗陷地堑式断陷盆地。盆地基底自周边向中部呈阶梯状递降,以叠瓦状构造与山地相接,地堑内第三系不整合于奥陶系之上,构成西翼陡、东翼缓的不对称的宽缓向斜,倾角 3°~10°,轴部位于银川新城西向北至平罗一线(图 1.3)。

银川平原地层由老至新简述如下。

前第三系:分布在贺兰山区,最老的地层为早元古界的黑云母斜长花岗岩和晚元古界长城系变粒石英片岩,风化裂隙和节理发育。寒武—奥陶系的灰岩、板岩、砂岩、白云质灰岩岩溶洞缝发育,以及白垩系的砾岩、泥质砂岩,岩性坚硬,裂隙发育。

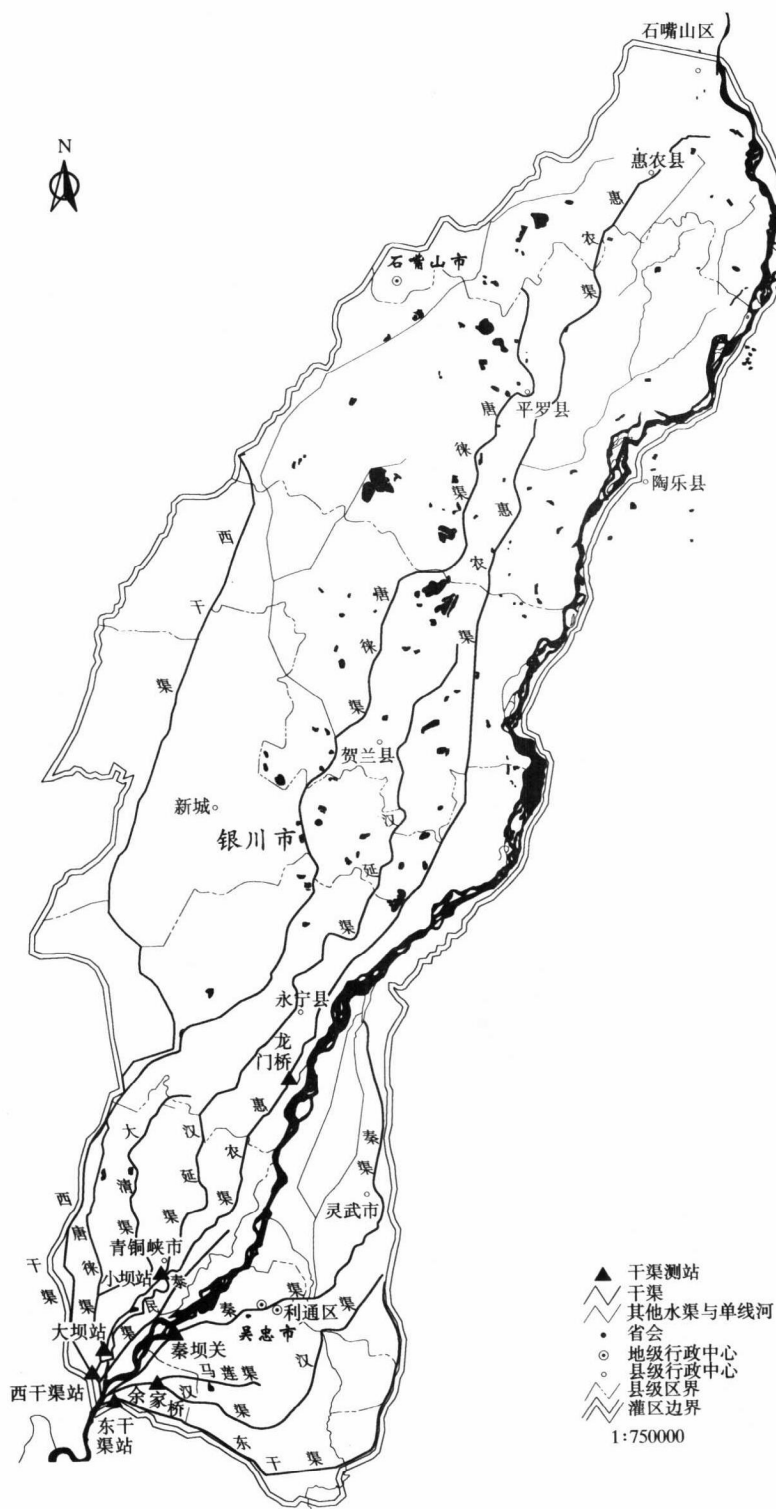


图 1.1 青铜峡灌区主要干渠及湖泊分布图

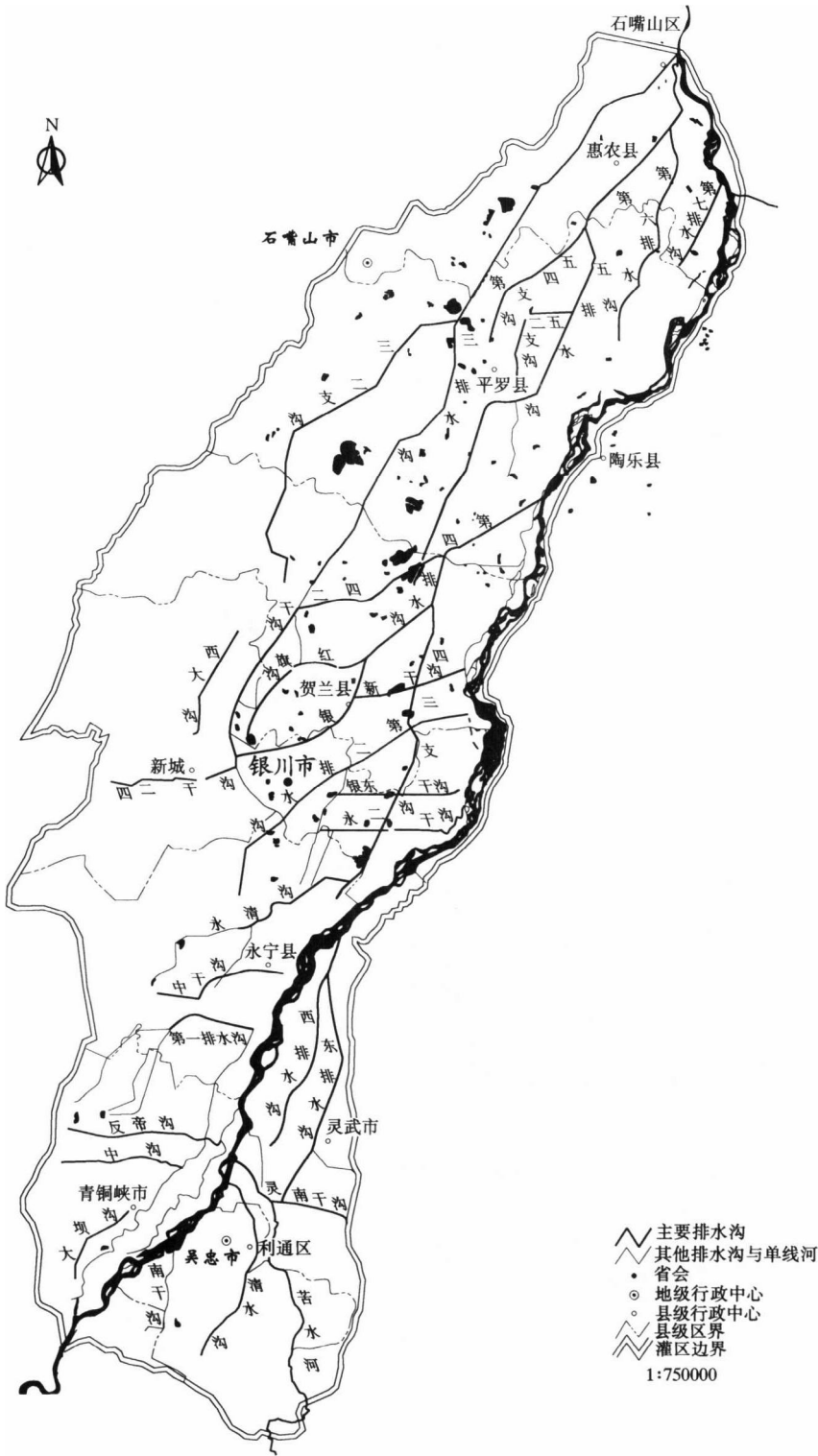


图 1.2 青铜峡灌区主要排水沟分布图

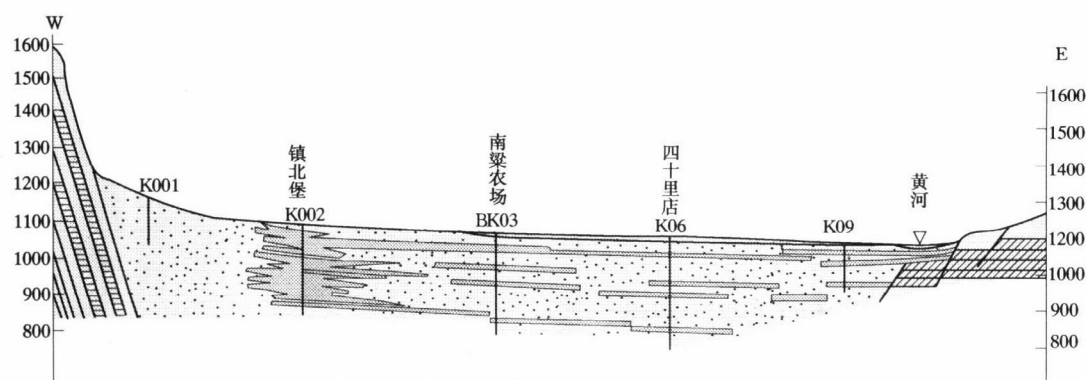


图 1.3 银川平原水文地质剖面示意图
(据银川市综合勘察报告)

第三系：主要分布在盆地东邻的鄂尔多斯台地和盆地的底部，岩性为浅橘黄色砂质泥岩及泥质砂岩，并夹有多层灰白色、青灰色半胶结砂岩及砂砾岩层。

第四系：银川盆地在第四纪一直处在持续沉降，并为区域的沉降中心，堆积了千余米的松散物质，除西侧贺兰山山前洪积外，堆积了以河湖积为主体的沉积物，其余三侧堆积了规模甚小的呈断续分布的洪积扇群。盆内中巨厚的砾卵石和砂层，为地下水的储存提供了极其良好的场所。

1.2.1 下更新统(Q1)

洪积物零星分布在贺兰山山前及大干沟沟口，岩性为灰白色、灰红色含块石、漂砾、砾石或碎石层，分选性差，呈棱角、次棱角状，厚度变化在 3~10m 之间。

冲洪积物在盆内两侧埋深 95~117m，中部埋深 370m，沉积厚度达 640m，岩性为土黄色、棕红色粘质砂土、粘土或中细砂夹多层砂质粘土。

1.2.2 中更新统(Q2)

冲洪积物分布在贺兰山前的大干沟等地，多构成碎石台地的顶盖，一般高出山前洪积倾斜平原 10~20m，岩性为灰白色、灰绿色砂砾石层，砾石多为棱角状，厚度小于 10m。

冲湖积物厚度约 250m，由盆地中部向两侧逐渐减少，中部埋深 113m，两侧埋深 24~65m，岩性为亚粘土、亚砂土及中细砂互层，底部为厚度小于 3m 的砂砾石层。

1.2.3 上更新统(Q3)

洪积物分布于贺兰山山前洪积倾斜平原，厚度大于 34m，沉积物颗粒自西向东由粗变细，岩性多为块石、碎石、砾石，向东过渡为含砾中细砂夹亚砂土。

冲湖积物除在新城等地裸露外，大部分埋深为 4~15.5m；沉积厚度 120m 左右，岩性为深灰色、土黄色亚砂土、亚粘土与砂互层，自下而上腐殖质含量增加。

1.2.4 全新统 (Q4)

全新统广布于银川平原，为不同沉积环境下形成的堆积物，成因类型有洪积物、冲洪积物、冲湖积物、冲积物及风积物等，厚度变化较大，一般均小于 40m。

1.3 水文地质

1.3.1 地下水的补给与排泄特点

银川平原地下水的补给是多源的，但主要来自渠道渗漏和渠灌水的田间入渗，其次是大气降水的入渗补给和贺兰山山前侧向径流和山洪的入渗补给。据统计，20 世纪 90 年代青铜峡灌区每年引水量约 60 亿 m^3 ，引水时间为 4 月下旬至 11 月中旬，渠系渗漏补给系数为 0.167~0.213，灌溉水田间入渗补给系数为 0.230~0.323，年均入渗补给量为 17.2 亿 m^3 ，约占年总补给量的 89.7%。同期，年降水量变化范围为 120~287mm，降水入渗补给系数为 0.100~0.132，年均降水入渗补给量约为 1.05 亿 m^3 ，占年总补给量的 5.5%。山前侧向径流和山洪年均入渗补给量约占年总补给量的 4.8%。

浅层地下水的排泄方式是多样的，但以潜水蒸发为主，由于水文地质条件的差异，各地占总排泄量的比例有所变化。在银北灌区，潜水蒸发排泄量占总排泄量的比例高达 70%，在银南灌区约为 40%。地下径流是浅层地下水的另一排泄方式，通过灌区排水支、干沟直接或间接的排入黄河，亦有相当部分地下水径流排向附近的湖泊或洼地，再蒸发消耗。在银川市下部承压水漏斗区，上层潜水还以越流方式向下层排泄。人工开采是浅层地下水的又一种排泄方式。

1.3.2 地下水渗流场

地下水的补给与排泄方式控制了地下水渗流场的态势，地下水渗流场具有三个显著特性：

(1) 从流场的整体上看，潜水流由南西朝北东方向运移。在平原南部，潜水水位等值线在黄河河道附近弧形曲度增大，弧度轴线方向与河道走向吻合，表明潜水向黄河排泄，在叶盛—北滩地段排泄量为最大；在平原北部，潜水水位等值线与黄河相交，几乎呈垂直状态，表明潜水与黄河水处于动态平衡状态。

(2) 从潜水等水位线分布的疏密状态上看，南部和西南部水位等值线排列较紧密，而北部则较稀疏，表明前者水力坡度较大，流动速率较快，后者则水力坡度较小，流动速率较缓，两者的分界线位于银川市附近。

(3) 从流场的流动态势上看，可将银川平原分为三个水动力带：西部和西南部为水交替流畅带（包括西部冲洪积区和银南地区），北部和东北部为水交替缓慢的阻滞带（惠农、石嘴山地区），两者之间为水交替过渡带。

银川平原潜水渗流场的三个显著特性，对于该区合理开发利用地下水和引用黄河水，正确调控和分配水资源以及引排水工程的设置和科学管理等方面均具有重要意义。

1.3.3 地下水水化学

银川平原潜水浓度（矿化度）变化范围为 $1.5 \sim 3.5\text{g/L}$ ，主体浓度值为 $1.5 \sim 2.0\text{g/L}$ 。浓度 $3.0 \sim 3.5\text{g/L}$ 的潜水以岛状形态主要展布在银川平原北部的前进农场和渠口两个地区，但圈闭的范围均不大。根据水资源评价水质分类的要求，溶解固体量（TDS）小于 2g/L 的地下水谓之淡水，溶解固体量（TDS） $2 \sim 5\text{g/L}$ 的谓之微咸水，溶解固体量（TDS）大于 5g/L 的谓之咸水。据此，银川平原潜水多为淡水，少数为微咸水，主要分布在银川平原的北部。

由于长期以来大量引黄灌溉的人为因素的作用和影响，改变了潜水水化学性质的天然特性，并使其繁杂和凌乱。从整体上看，潜水浓度变化的总趋势是由西向东，由南向北呈增高态势，水化学类型相应由重碳酸、硫酸盐型转变为氯化物型水，水质渐趋变差。潜水浓度场与渗流场的分布态势基本上是吻合的。

1.3.4 地下水位动态

银川平原潜水位动态主要受控于引黄灌溉，次为大气降水的补给，而蒸发和排水沟排放的沟排水为其主要排泄途径。根据 1990~1998 年银川平原各地区潜水埋深观测资料统计勾画的月平均埋深曲线图（图 1.4）表明：每年 4 月下旬开始春灌，灌后潜水位大幅度抬升，升幅在 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 之间；5 月上旬至 9 月上旬，潜水平均埋深上升到 1m 左右，最高水位可临近地表，该时段是作物生长的需水时期，蒸发排泄量较大；9 月中旬夏灌结束，潜水位开始下降延至 10 月中旬，降幅在 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 之间；10 月下旬冬灌开始，水位再次回升；12 月至次年 4 月中旬，水位逐渐下降，最大平均埋深在 2.0m 左右。潜水埋深的年际动态与灌溉周期基本吻合并处于稳定状态。从总体上看，潜水埋深和水位变幅由灌区南部朝北部方向均呈减小变化趋势。银川平原潜水位动态类型属灌溉入渗—蒸发径流型。

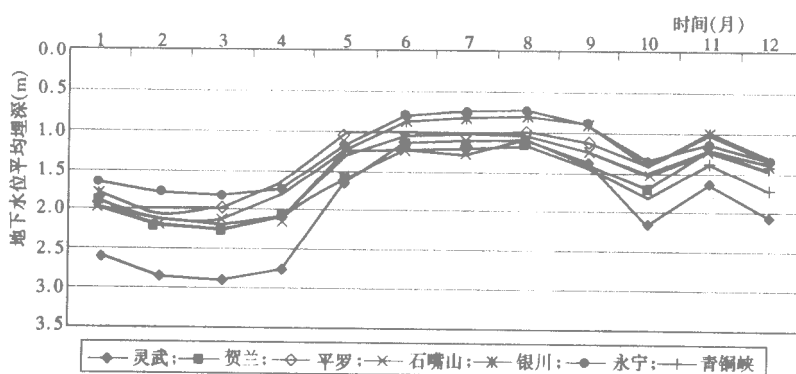


图 1.4 青铜峡灌区地下水位月平均埋深曲线

1.3.5 水文地质分区

根据地质、地形地貌、地下水类型和地下水埋藏条件等，可将银川平原由西向东划分

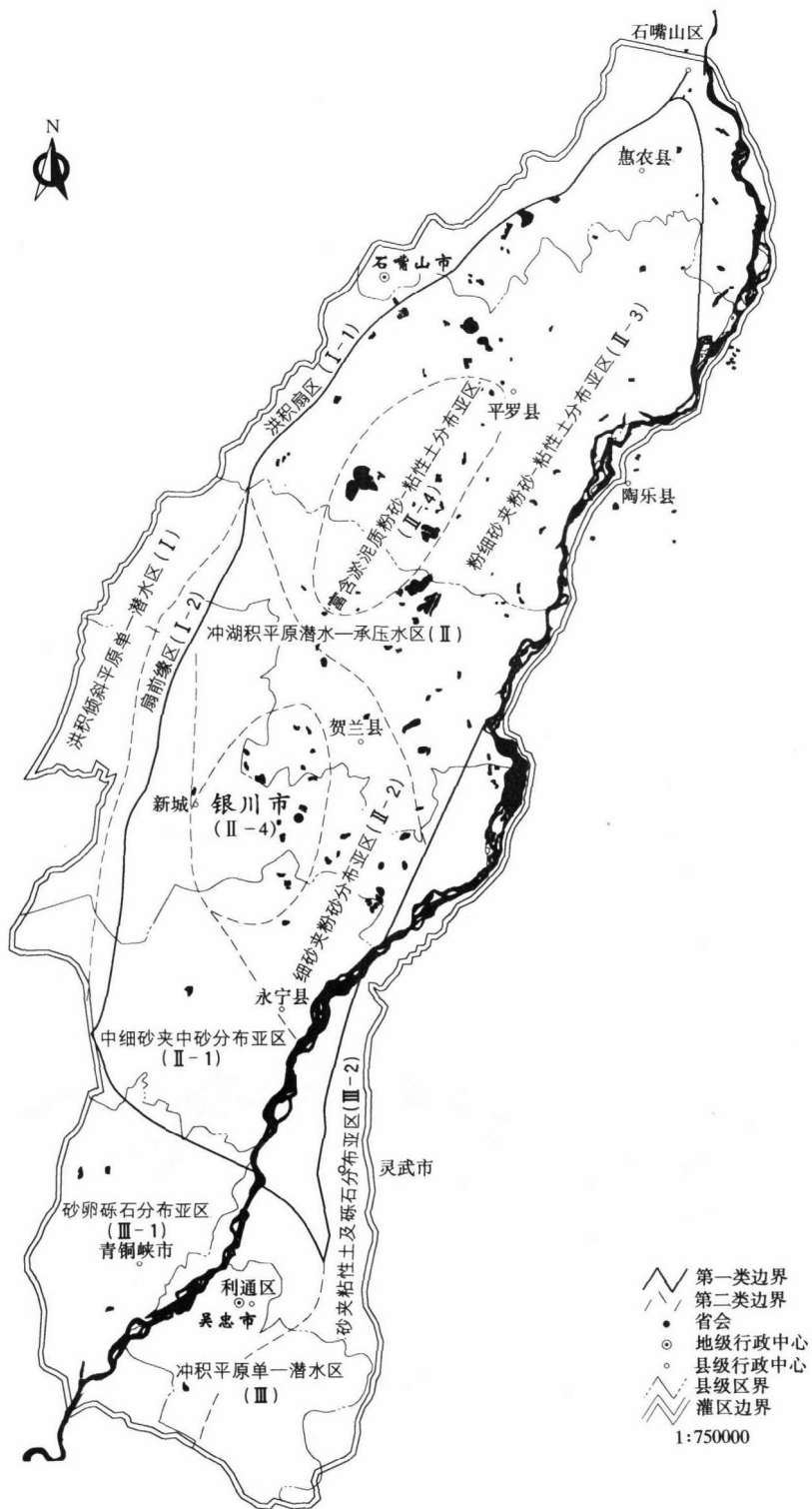


图 1.5 银川平原水文地质分区略图

为西部山前洪积倾斜平原单一潜水区，中部冲湖积平原潜水—承压水区和东部及青铜峡口外冲积平原单一潜水区三个水文地质区，进而据岩性粒度差异和富水程度划分出七个水文地质亚区（图 1.5）。

1. 西部山前洪积倾斜平原单一潜水区（Ⅰ）

该区位于贺兰山和马鞍山东麓山前第四系碎石、砾石等洪积层分布区，东西向宽 1~10km 不等，呈近似南北向条带状分布，储水层岩性单一，揭露厚度大于 150m，潜水埋深大于 30~50m，降深 15m 时单井出水量均在 $200\sim300\text{m}^3/\text{h}$ 以上，水量极其丰富。根据洪积物沉积颗粒由西向东变细的特点，可将该区划分为洪积扇（Ⅰ-1）和扇前缘（Ⅰ-2）两个水文地质亚区。

2. 中部冲湖积平原潜水—承压水区（Ⅱ）

该区广布于银川平原中部，主要由全新统河湖相砂层构成潜水含水岩组和由上更新统河湖相砂夹粘土构成承压含水岩组。该区东西向宽度为 20~25km，呈南北向带状分布。鉴于该区岩性由南至北粒度明显变细，富水程度逐渐变差，可将该区划分为四个水文地质亚区。

南段为中细砂夹中砂分布亚区（Ⅱ-1），含水岩组厚度在平原中部为 30m 左右，在沉降中心处增至 60m 左右，向东西边缘减至 20m 左右；15m 降深时单井出水量为 $50\sim100\text{m}^3/\text{h}$ 。

中段细砂夹粉砂和粘性土透镜体分布亚区（Ⅱ-2），含水岩组厚度在平原中部为 40m，沉降中心增至 50m，向东西边缘减至 20~30m，单井出水量为 $20\sim50\text{m}^3/\text{h}$ 。

北段粉细砂夹粉砂、粘性土透镜体分布亚区（Ⅱ-3），含水岩组厚度在平原中部为 10 余 m，两侧边缘减至不足 10m，15m 降深时单井出水量不足 $20\text{m}^3/\text{h}$ 。

在Ⅱ-2 和Ⅱ-3 亚区的中南段，各分布富含淤泥质粉砂、粘性土亚区（Ⅱ-4）。

3. 东部及青铜峡口外冲积平原单一潜水区（Ⅲ）

该区位于银川平原东部和青铜峡口外的全新统冲积砂卵砾石和砂粘土分布区。鉴于两区岩性差异显著，可分为两个水文地质亚区（Ⅲ-1、Ⅲ-2）。砂卵砾石分布亚区（Ⅲ-1），呈片状分布，岩性组合单一，无粘性土隔层，含水岩组厚度为 20~30m，降深 15m 时单井出水量除峡口外局部地带在 $100\sim200\text{m}^3/\text{h}$ 外，均在 200 或 $300\text{m}^3/\text{h}$ 以上，水量丰富，水位埋深在峡口区不足 2m。砂夹粘性土及砾石分布亚区（Ⅲ-2），颗粒较细，尤其是黄河以东颗粒更细，层次减少，富水性差，降深 15m 时单井涌水量为 $50\sim100\text{m}^3/\text{h}$ 。有的仅为 $20\sim50\text{m}^3/\text{h}$ 。

2

水盐循环和均衡

2.1 研究背景和思路

银川平原地处气候干旱地带，降水稀少，蒸发强烈。坐落于平原北部的银北灌区（面积为 3471km^2 ），地势平坦低洼，地下水交替处于滞流状态，是平原汇水聚盐的地区，致使土壤盐渍化严重，是历来盐渍化研究的重点地区，而银南地区则与此相反。据统计，银北灌区将近一半的耕地遭受不同程度的盐害，还有 8万 hm^2 的盐碱地至今依然是荒漠。潜水溶解固体量（TDS）较高，其下伏的承压淡水因开采成本高、补给量有限，不宜用于灌溉。这就决定了灌区发展农业生产主要赖以调用黄河水，且黄河水富含营养盐有利于农作物生长，又可对含盐土壤起到冲洗、淋滤作用，利于土壤的淡化。因此，早在公元前 215 年修筑了秦渠、汉延渠，继而在东汉时期又兴建了汉渠、唐徕渠、昌淪渠等引黄水渠，用以屯垦，发展农业生产。当时只注重引水灌溉，采用大水压碱，冬灌洗盐等无排水设施来降低土壤表层含盐量，保证农作物出苗、生长和成熟，因冲洗后高含盐的地下水和冲洗水没有排水出路，只能收到局部和暂时的效果，通常是“此处压彼处发”，至 1949 年灌溉面积仅 6.7万 hm^2 。中华人民共和国成立以来，水利事业有了空前的发展，兴建了引水输水渠道和排水干沟，形成了沟渠纵横交错、井站密布、排灌配套的水利工程体系，成为灌溉面积约 30万 hm^2 的大型灌区。至 20 世纪 90 年代末，年引黄灌溉水量已逾 60亿 m^3 。引黄灌溉在灌区产生了 3 个显著的正效应：一是充分满足了农作物生长的需水量；二是引黄水对盐化土壤起到了冲洗作用，促使土壤朝脱盐淡化的方向发展；三是造就了银川平原成为西部地区一枝独秀的“塞上江南”。但是，任何事物总是一分为二的，正如名言告诫的“水能载舟，亦能覆舟”。换言之，水能洗盐，亦能积盐，年复一年的大量引用

黄河水，其所携带的一定数量的可溶盐在灌区积累，使土壤含盐量增高；同时灌区水储量持续增大，地下水位居高不下，引发地下水中盐分向上方土壤层迁移，结果是盐分回归于土壤表层，又加剧了土壤盐渍化程度，这是引黄灌溉产生的负效应。如何正确充分地发挥引黄灌溉产生的正效应、消除负效应，乃是改善灌区土壤质量、扩大耕地面积、发展农业生产的一个至关重要的问题。

不言而喻，灌区的土壤盐渍化是发展农业生产的严重障碍。引发土壤盐碱化的影响因素颇多，但可将其归结为天然的和人为的两类。前者包括自然地理、气候、水文和水文地质等诸因素，后者包括引水灌溉、沟道排泄和水利基础设施的布局等诸因素。这些因素的相互交叉、制约和叠加的综合作用结果，必然持续不断地改变着灌区水盐循环的过程和态势，包括地表水量和地下水量的相互转化、地表水的流动态势、地下水的渗流场和化学场、水盐相互作用产生的物质成分的转移，以及土壤含盐量及其盐类成分的构成等，均会发生动态变化。查明灌区水盐循环及演化规律，开展水盐均衡调控，是解决前述问题的核心命题。

为此设计的研究思路是：首先从灌区水盐循环的现状着手，查明和论证不同类型水的补给、排泄特征及其数量，不同类型水中携带的可溶盐成分和数量，不同类型水循环的相互关系及在灌溉水中所占的比例和对农作物生长的作用和贡献，这些研究形成的认识和取得的数据，是灌区水盐均衡研究的基础资料和依据。在此基础上，率定水盐进入灌区的输入项和流出灌区的排出项，建立水盐均衡方程。据其计算结果，评价灌区积脱盐的进程，拟定灌区渠道引水量和沟道排水量之比，以及开发潜水灌溉的可能性和必要性等。以下以盐渍土发育的银北灌区为例论之。

2.2 水盐供源和循环

2.2.1 大气降水及其盐量

银北灌区以气候干旱，降水稀少，蒸发强烈，空气湿度较低为主要特征。多年平均降水量为 192mm，枯水年不足 100mm，丰水年超过 350mm，蒸发量为 1162mm (E601)，相对湿度为 52%~60%，气温为 8℃。在内陆地区的降水，混有大气中的尘埃、细菌等，其化学成分以 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 为主，溶解固体量一般为 0.02~0.05g/L。

经计算，每年进入灌区的降水量为 6.65 亿 m^3 ，年降水供给灌区的盐量约为 2.09 万 t。

2.2.2 地表水水盐循环

银北灌区的地表水循环主要受控于引黄灌溉水量和区内干沟的排水量两大要素，而降水、地下水灌溉、山区径流等在灌区水盐循环中的作用和贡献与引黄灌溉量和干沟的排水量相比处于次要地位，所占份额很低。例如，根据 1984~1988 年监测资料统计计算结果：

引黄灌溉水量：降水量：山区径流补给量 = 131.9：34：1

引黄灌溉量为其他各项供水量之和的 3.7 倍。由此可见，人类活动进行的引黄灌溉在

灌区水循环系统中发生广泛而深刻的影响，远远超越自然因素对灌区水循环的影响强度。人类活动的作用力具有显著的主动性和定向性，既要满足农作物生长的需水量和降低土壤的含盐程度，又要改善农田生态环境，促使农业增产。因此，应合理调控地表水及其与地下水在循环过程中的量比关系。

1. 引黄灌溉水的水盐输入状况

引入黄河灌溉水量是地表水输入灌区的水盐主体项。灌区建筑了高出地面规模不等的引水渠道系统，将地面分割成不同的地面排水单元。事实上，这类渠道已成为地表水的分水岭，限制和改变了地下水的流动路线和态势。在渠道行水的灌溉期间，引进灌区的大量黄河水，通过渠系渗漏和田间灌溉迅速转化为土壤水，后又入渗补给地下水；由于渠系渗漏，在渠道附近出现明水，进而形成沼泽，渠道两侧的地下水位抬高。据 1984~1988 年期间的资料，渠道年均引黄灌溉水量为 25.85 亿 m^3 ，水的溶解固体量为 0.44g/L，带入灌区的年均盐量为 113.7 万 t。引黄灌溉通过对土壤水施加影响来满足农作物生长的需水量，但过量的引水和排水不足，则会加剧地下水位的抬高和土壤盐渍化。

2. 排水干沟的水盐输出状况

灌区内大体呈北东向、与干渠交接连通的排水干沟超过 8 条，其中第二、三、四、五排水沟、银新沟和永二干沟为区内的 6 大干沟，干沟底界面已切入潜水水位，这些干沟是灌区地表水和地下水水盐排出的主体通道。排水沟年均排出的水量由 1958 年的 3.91 亿 m^3 至 1994 年增高至 14.23 亿 m^3 （表 2.1），接近同期年引黄灌溉水输入量的一半，主要排出的是地表水，地下水所占份额很低，仅占 27%。按 1984~1988 年沟排水年均溶解固体量计算，沟排水年均带走盐量为 134.83 万 t（含污水排放带走的盐量），其排放量比引入量高出 21.17 万 t。排水干沟排出灌区的水盐量是整个灌区排水脱盐的主体组成量，是灌区脱盐的主导力量。因此，沟道的排水活动可改善灌区土壤水和地下水的循环条件，也是土壤脱盐的至关重要的途径。

表 2

银北灌区主要排水沟排水量

单位：万 m^3

沟 名	时 段	1958 年	1964 年	1974 年	1984 年	1994 年
第二排水沟	非灌溉期	398.4	434.3	215.8	315.2	720.1
	灌溉期	11229.9	19135.4	6233.7	7941.3	9923.0
	小 计	11628.3	19569.7	6449.5	8256.5	10643.1
第三排水沟	非灌溉期	427.9	196.8	506.6	493.2	1561.6
	灌溉期	12791.5	8193.6	9521.1	13038.0	16004.3
	小 计	13219.4	8390.4	10027.5	13531.2	17565.9
第四排水沟	非灌溉期	382.2	669.9	1145.6	1572.8	3393.6
	灌溉期	11216.5	26314.9	30050.8	31041.8	36314.7
	小 计	11598.7	26984.6	31196.4	32614.6	39708.3

续表

沟 名	时 段	1958 年	1964 年	1974 年	1984 年	1994 年
第五排水沟	非灌溉期	117.8	181.2	318.7	671.1	661.4
	灌溉期	2505.1	4928.6	10898.8	13300.6	20283.1
	小 计	2622.9	5109.8	11217.6	13971.7	20944.5
银新沟	非灌溉期			1.3	4.1	1131.1
	灌溉期			5679.9	17295.9	11582.3
	小 计	0.0	0.0	5681.3	17300.0	12713.4
永清沟	非灌溉期			484.4	452.8	373.3
	灌溉期			7377.7	6897.2	11423.8
	小 计	0.0	0.0	7862.1	7350.0	11797.1
永二千沟	非灌溉期			232.4	219.5	345.5
	灌溉期			6690.8	6320.5	9192.7
	小 计	0.0	0.0	6923.2	6540.0	9538.2
直接入黄小沟	非灌溉期					
	灌溉期					
	小 计			11600.0	11830.0	19400.0
合 计	非灌溉期	1326.3	1482.2	2904.8	3728.7	8186.7
	灌溉期	37743.1	58572.5	76452.8	95835.3	114723.9
	小 计	39069.4	60054.7	90957.6	111394.0	142310.6

注 1958 年、1964 年直接入黄小沟无资料。

2.2.3 土壤水水盐循环

土壤水是地表水和地下水相互转化的中间形式，其上承接大气降水和灌溉水的入渗补给，其下受控于潜水位的变化，既可接受潜水补给，又可入渗补给潜水。土壤水除被农作物吸收外，主要通过蒸腾蒸发形式消耗。在各项水量的相互转化中，仅蒸腾蒸发为外向型转化，带走灌区内的部分水盐量，其他的水盐循环均发生在灌区内的地表水、土壤水和地下水各子系统之间。

经计算，灌区各项通过蒸腾蒸发年消耗水量为 17.17 亿 m^3 ，而作物生长吸收的盐量为 3.78 万 t。

2.2.4 地下水水盐循环

银北灌区地下水的补给来自大气降水、引黄灌溉水的入渗和山前地下径流；排泄方式为潜水蒸发、排水沟排泄和地下水开采等。地下水与黄河水的补排关系随黄河水丰枯期而变化，丰水期黄河水补给地下水，枯水期地下水排泄于黄河。地下水的水盐循环与变化受控于上述各项补排量比。

研究表明，灌溉水的入渗补给量、降水入渗补给量和山前地下径流补给量之比约为

37:2.2:1, 相应供给灌区的盐量之比顺序大体亦是如此。显然, 地下水的盐分补给量主要取决于引黄灌溉水的盐量; 在地下水的排泄量中, 排水沟的排出量占首要地位, 而其他项在盐量增减上的作用仅在潜水、土壤水和土壤之间盐量的循环和重新分配, 并不带出灌区。因此, 灌区地下水的水盐循环主要由黄灌水和沟排水两者的量比关系决定, 并主控着地下水中盐分的增减。

灌区引黄灌溉的目的是提供土壤和地下水的水分, 既要满足农作物发育生长的生理需水量, 又要满足冲洗与降低根系层盐分的需水量; 而灌区排水的目的是降低灌区地下水水位, 增强土壤水向下运行循环, 避免根系层中盐分的积累和改善农业生态环境。因此, 排水活动应以增加地下水在总排水量中的比例和确保地下水不再返盐至土壤根系层为标准。

2.3 水盐均衡计算

灌区水盐动态变化和土壤盐渍化的产生, 归根结底是个水盐均衡问题。水盐动态变化是水盐均衡的外在表现形式, 是水盐均衡变化的表现结果。水均衡又决定其盐均衡。在水盐均衡计算中, 输入研究区的水、盐量即是研究区补给的水盐量; 输出研究区的水、盐量即是研究区排泄的水盐量。在均衡期中, 当输入的水、盐量大于输出的水、盐量时, 谓之正均衡; 反之, 谓之负均衡。本次选用数据较齐全、精度较高, 并为以往研究多次被引用的 1984~1988 年的监测资料进行水盐均衡分析和计算。

首先从地表水、土壤水、地下水水均衡方程入手, 建立灌区综合水均衡方程, 确定影响盐分迁移与积累的均衡项, 分析载盐主体, 进行盐量综合评价。

本次水、盐均衡计算与以往计算的主要差别是:

(1) 考虑了土壤水均衡方程, 剔除了地表水、土壤水、地下水相互转化中的内部转化量潜水蒸发项和井灌回归项。

(2) 在盐均衡计算中, 考虑了作物吸盐量和化肥施用量。

(3) 分析计算了作物吸盐量、排水沟排盐量和化肥施用量。

其他水、盐量参数均引自“宁夏银北灌区排水工程效益与优化模式”(宁夏农业综合开发办公室等, 1995 年 8 月)。

2.3.1 灌区水均衡方程式

(1) 地表水均衡方程式:

$$\text{总补给量} = W_{\text{渠引}} + W_{\text{降雨}} + W_{\text{山径}} + W_{\text{深开}} + W_{\text{浅开}}$$

$$\text{总消耗量} = W_{\text{沟表}} + W_{\text{工城}} + W_{\text{降渗1}} + W_{\text{渠渗1}} + W_{\text{渠田渗1}} + W_{\text{井田渗1}} + W_{\text{排污}}$$

(2) 土壤水均衡方程式:

$$\text{总补给量} = W_{\text{降渗1}} + W_{\text{渠渗1}} + W_{\text{渠田渗1}} + W_{\text{井田渗1}} + W_{\text{潜蒸}}$$

$$\text{总消耗量} = W_{\text{降渗2}} + W_{\text{渠渗2}} + W_{\text{渠田渗2}} + W_{\text{井田渗2}} + W_{\text{农林}} + W_{\text{荒蒸}}$$

(3) 地下水均衡方程式:

$$\text{总补给量} = W_{\text{降渗2}} + W_{\text{渠渗2}} + W_{\text{渠田渗2}} + W_{\text{井田渗2}} + W_{\text{山侧}}$$

$$\text{总消耗量} = W_{\text{潜蒸}} + W_{\text{沟地}} + W_{\text{河排}} + W_{\text{浅开}}$$

(4) 综合水均衡方程式：

$$\text{总补给量} = W_{\text{渠引}} + W_{\text{降雨}} + W_{\text{山径}} + W_{\text{山侧}} + W_{\text{深开}}$$

$$\text{总消耗量} = W_{\text{沟排}} + W_{\text{荒蒸}} + W_{\text{农林}} + W_{\text{工城}} + W_{\text{河排}}$$

式中 $W_{\text{渠引}}$ ——各干渠引水量之和，亿 m^3 ；
 $W_{\text{降雨}}$ ——降水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{山径}}$ ——贺兰山流入的径流量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{深开}}$ ——深层地下水开采量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{浅开}}$ ——浅层地下水开采量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{沟表}}$ ——排水沟排出的地表水量（扣除排污量），亿 m^3 ；
 $W_{\text{工城}}$ ——工业及城镇生活耗水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{降渗1}}$ ——降水入渗补给土壤水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{渠渗1}}$ ——渠系渗漏补给土壤水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{渠田渗1}}$ ——渠灌田间入渗补给土壤水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{井田渗1}}$ ——井灌田间入渗补给土壤水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{排污}}$ ——工业废水及城市生活排污量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{潜蒸}}$ ——潜水蒸发耗水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{降渗2}}$ ——降水入渗补给地下水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{渠渗2}}$ ——渠系渗漏补给地下水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{渠田渗2}}$ ——渠灌田间入渗补给地下水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{井田渗2}}$ ——井灌田间入渗补给地下水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{农林}}$ ——农林渔各业耗水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{荒蒸}}$ ——降落在荒地上的降水量（扣除径流后的蒸发量），亿 m^3 ；
 $W_{\text{山侧}}$ ——贺兰山前地下水径流侧向补给量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{沟排}}$ ——排水沟排水总量（ $W_{\text{沟排}} = W_{\text{沟表}} + W_{\text{沟地}} + W_{\text{排污}}$ ），亿 m^3 ；
 $W_{\text{沟地}}$ ——排水沟排出的地下水量，亿 m^3 ；
 $W_{\text{河排}}$ ——地下水直接排入黄河的水量，亿 m^3 。

以上参数均按年均计算。

地表水、土壤水、地下水三个均衡方程共涉及 20 个均衡项（因 $W_{\text{沟排}} = W_{\text{沟表}} + W_{\text{沟地}} + W_{\text{排污}}$ ，故按一项考虑），其中 10 项（表 2.2）涉及灌区水量的流入与流出，反映了灌区与外界的水盐交换进程和强度，谓之外向型转化均衡项，它们决定了灌区总盐量的增减；其余 10 项（ $W_{\text{降渗1}}$ 、 $W_{\text{渠渗1}}$ 、 $W_{\text{渠田渗1}}$ 、 $W_{\text{井田渗1}}$ 、 $W_{\text{降渗2}}$ 、 $W_{\text{渠渗2}}$ 、 $W_{\text{渠田渗2}}$ 、 $W_{\text{井田渗2}}$ 、 $W_{\text{潜蒸}}$ 、 $W_{\text{浅开}}$ ）为灌区内地表水、土壤水、地下水各子系统间的水量转化，谓之内向型转化均衡项，它们不影响灌区内总水量的增减，也不影响总盐量的变化，但随着水量在子系统间的循环转化，其所携带的盐分将从一个子系统进入另一个子系统。也就是

说，降水入渗过程、潜水蒸发过程和浅层地下水开采灌溉过程等，直接影响灌区内盐分的空间分布。降水和灌溉水的入渗，盐分由地表逐渐被带往地下，即表层脱盐，其下方积盐；而随着潜水蒸发和浅层地下水开采，下层的盐分又被带往上部。

从外向型转化的水量构成来看（表 2.2），渠道引水是灌区水量的主要来源，约占 76.3%，其次为降雨带来的水量，约占 19.6%，其余仅占 4.1%；在排出和消耗的水量中，农林渔耗水所占的份额最大，约 51.4%，次为排水沟排水量，占 35.6%，荒地蒸发，占 10.3%，其余的仅占 2.6%。

表 2.2 1984~1988 年银北灌区引排水量

项 目	引入水量 (亿 m ³)	占引水总量 (%)	项 目	排出水量 (亿 m ³)	占排水总量 (%)
渠道引水	25.850	76.28	排水沟排出 ^①	11.890	35.62
降 雨	6.650	19.62	农林渔耗水	17.170	51.45
山区径流	0.196	0.58	荒地蒸发	3.445	10.32
地下水侧向补给	0.213	0.63	工业及城市耗水	0.644	1.93
深层地下水开采	0.980	2.89	地下水排入黄河	0.008	0.02
合 计	33.889	100.00	越流排泄量	0.220	0.66
			合 计	33.377	100.0

其中排污水量约 0.75 亿 m³。

综合水均衡分析计算结果如下：

$$\text{总补给量} - \text{总消耗量} = 33.889 - 33.377 = 0.512 (\text{亿 m}^3)$$

由此可见，灌区水量补排差很小，基本处于均衡状态。

2.3.2 灌区综合盐均衡方程式

根据综合水均衡方程式，建立相应的综合盐均衡方程式，并在总引盐量中增加了灌区施用化肥量一项。

$$\text{总引盐量} = S_{\text{渠引}} + S_{\text{降雨}} + S_{\text{山径}} + S_{\text{山侧}} + S_{\text{深开}} + S_{\text{化肥}}$$

$$\text{总排盐量} = S_{\text{沟排}} + S_{\text{荒蒸}} + S_{\text{农林渔}} + S_{\text{工城}} + S_{\text{河排}}$$

式中 $S_{\text{渠引}}$ ——渠水带入的盐量，万 t；

$S_{\text{降雨}}$ ——降水带入的盐量，万 t；

$S_{\text{山径}}$ ——山区径流带入的盐量，万 t；

$S_{\text{山侧}}$ ——地下水侧向补给带入的盐量，万 t；

$S_{\text{深开}}$ ——深层地下水带入的盐量，万 t；

$S_{\text{化肥}}$ ——化肥施用量（折纯量 5.5 万 t，根据宁夏统计年鉴：1994 年全灌区化肥施用量为 11.808 万 t，其中银北灌区 6.107 万 t，1988 年有效灌溉面积为 1994 年的 90%），万 t；

$S_{\text{沟排}}$ ——排水沟年排出的盐量，万 t；

$S_{\text{荒蒸}}$ ——荒地蒸发带走的盐量, 万 t;

$S_{\text{农林渔}}$ ——农林渔各业带走的盐量, 万 t;

$S_{\text{工城}}$ ——工业及城镇耗水带走的盐量, 万 t;

$S_{\text{河排}}$ ——地下水排入黄河带走的盐量, 万 t。

众所周知, 作物生长吸收盐分, 并随着作物的收获, 盐也就从土壤中析出, 但目前在这方面可供借鉴的资料不多, 通常认为该量不大。据宁夏科技情报所翻译的《盐碱地在灌溉条件下的综合改良》一书中 (1989) 前苏联 K. II. 帕克、II. II. 别古切夫等在碱地上实验研究表明 (表 2.3), 当春小麦产量为 $3000\text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 从土壤中析出的盐量为 $107.6\text{kg}/\text{hm}^2$; 当玉米产量为 $5000\text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 析出的盐量为 $430.6\text{kg}/\text{hm}^2$ 。另据内蒙古水利科学研究院田桂萍、康双阳在内蒙古河套灌区盐碱化程度不同的盐碱土壤进行试验, 测试分析了小麦各生育阶段体内盐分含量的动态变化规律, 列出的小麦成熟期大田调查成果 (表 2.4) 表明: 当土壤含盐量小于 0.33% 时, 小麦体内的蓄盐量变化为 $250 \sim 390\text{kg}/\text{hm}^2$, 并随着土壤含盐量的增加而增大; 当土壤含盐量大于 0.33% 时, 小麦体内的蓄盐量随着土壤含盐量的增加而减小。为了对作物吸盐有个量级概念, 本次对植物体吸盐量进行了粗算, 春小麦体内蓄盐量采用 $350\text{kg}/\text{hm}^2$, 种植面积按 5.5万 hm^2 (82 万亩) 计; 玉米吸盐量采用 $430\text{kg}/\text{hm}^2$, 种植面积按 4.3万 hm^2 (65 万亩) 计; 则银北灌区每年由作物带走的盐量为 3.78万 t 。

表 2.3 随着农作物的收获盐分的析出量 单位: kg/hm^2

作物	收获量	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	S^{2+}	Cl^-	总计
冬小麦	4.0×10^3	25.0	7.0	26.0	1.4	5.5	14.0	78.9
春小麦	3.0×10^3	70.0	5.0	2.7	9.0	8.4	12.5	107.6
玉米籽	5.0×10^3	286.4	11.4	77.6	36.0	2.1	17.0	430.6
向日葵	1.8×10^3	279.0	5.7	67.5	29.5	2.0	57.0	440.7
苜蓿干草	12.0×10^3	150.0	9.6	215.5	22.0	14.0	30.0	441.1

表 2 小麦成熟期大田调查成果

取样地点	上游磴口县				中游临河市				下游乌前旗			
土壤含盐量 (%)	0.076		0.25		0.162		0.35		0.112		0.33	
	地上	地下	地上	地下	地上	地下	地上	地下	地上	地下	地上	地下
干生物量 (kg/hm^2)	19200	1299	11107	885	13171	922	7187	451	13954	967	7140	459
小麦体蓄盐量 (kg/hm^2)	311	22.5	317	14.3	378	11.6	265	10.5	357	9.9	246	10.4

综合盐均衡分析计算结果如下 (表 2.5):

$$\text{总补给盐量} - \text{总排泄盐量} = 135.29 - 141.91 = -6.62 (\text{万 t})$$

由此可见, 灌区盐量补排差是负值, 为负均衡, 灌区处于脱盐进程。