

东亚大陆裂谷医疗矿水 水文地球化学研究

——以山西和贝加尔裂谷系为例

王焰新 (俄) 葛·马·斯贝泽尔 著



中国环境科学出版社

中国国家自然科学基金

中国国家攀登计划预选项目(95-预-39)

俄罗斯联邦高等教育委员会

中国地质大学“211工程”学术著作出版基金

联合资助

东亚大陆裂谷医疗矿水 水文地球化学研究

——以山西和贝加尔裂谷系为例

王焰新 (俄)葛·马·斯贝泽尔 著

中国环境科学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

东亚大陆裂谷医疗矿水水文地球化学研究:以山西和
贝加尔裂谷系为例/王焰新, (俄) 斯贝泽尔著. —北
京:中国环境科学出版社, 2000. 4

ISBN 7-80135-061-8

I. 东... II. ①王...②斯... III. 大陆裂谷-矿水-
水文地质-地球化学-研究-东亚 IV. P641.631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19505 号

中国环境科学出版社出版
(100036 北京海淀区普惠南里 14 号)
北京市联华印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2000 年 4 月 第 一 版	开本	850×1168	1/32
2000 年 4 月 第一次印刷	印张	3 1/2	插页 1
印数 1—1 000	字数	100 千字	

定价: 8.00 元

前 言

大陆裂谷带以其雄伟独特的地貌景观,复杂多样的构造变形和强烈频繁的地震活动,引起了众多地质学者的关注。本书即选取东亚大陆上两个著名的裂谷——贝加尔和山西裂谷系作为研究区,试图从水文地球化学角度为大陆裂谷资源与环境科学研究提供一些新的认识和基础性资料。本书所重点研究的这两个裂谷,在地质条件、地球物理和地球化学特征等方面呈现出诸多相似性。在强烈的喜马拉雅期构造运动和复杂的围岩介质环境影响下,这些地区形成了各种类型的地下水,其中包括本书重点论述的独特类型地下水——医疗矿水。

顾名思义,医疗矿水与其它类型地下水的主要区别在于具有一定的医疗作用,亦即,医疗矿水因其独特的物理-化学性质(矿化度、离子-盐类组分、气体成分、生物活性组分、温度等)而对人体疾病具有疗效或对人体起到保健作用。矿水的划分方案有很多种,如根据其使用方法,可分为内服(饮用)医疗矿水和外用(外敷、浴疗)医疗矿水两种。根据其达到最低限量的成分,可分为氟水、碳酸水、硫化氢水、铁水、碘水、溴水、硅酸水等。在本书涉及的研究区域,发育多种类型的矿水。基于多年来的研究资料,并参照水文地球化学学科奠基人之一——前苏联奥弗钦尼科夫(А. М. Овчинников)教授的矿水分类方案,我们认为,可依据水中主要溶解气体组分,把研究区的医疗矿水划分为三种基本类型:含氮热水、碳酸水和硫化氢热水。正如本书将要描述的那样,这三种矿水在赋存条件、水化学性质、同位素组成以及所经历的地球化学过程

等方面均存在差异,这种划分方案较好地反映了地质—地球化学环境对于矿水水文地球化学特征的宏观控制作用。

本书的第一章简要论述了研究区自然地理、气候和地质—水文地质条件。这些是决定矿水化学成分形成的主要影响因素,也是矿水水文地球化学研究的基础。

矿水是由离子—盐类组分、有机物质、溶解气体、微生物、胶体、络合物组成的极为复杂的水溶液。本书的第二章和第三章较系统地阐述了研究区上述三种类型矿水水化学特征和同位素组成特征,并剖析了其中所蕴含的地质—地球化学环境信息。

从化学热力学和化学动力学角度看,矿水常常是非平衡的复杂化学体系。其中所含的许多不稳定组分在地下水循环或排泄中会发生物理—化学变化。因此,本书的第四章研究了矿水中硫、铁、锶、氟等元素的水文地球化学行为。这对于阐明矿水中化学组分的赋存状态和迁移富集机制,具有重要的理论与实际意义。

与本书有关的中—俄国际合作研究始于1990年。研究工作得到以下单位和个人的大力支持和帮助:中国地质大学沈照理、孙连发教授和韦必则博士;中国科学院汪集旸院士;中国国土资源部陈梦熊院士、许绍倬教授、汪蕴璞研究员、籍传茂教授级高工、山西省水利厅鲁荣安、王延庚、陈德隆高工及孙彦贵、孙秀山、王宏义、刘文运、邓宝柱先生;俄罗斯人民友谊大学郝斯托夫(А. П. Хаустов)教授、俄罗斯国立伊尔库茨克大学副校长斯米尔诺夫(А. И. Смирнов)院士、俄罗斯科学院西伯利亚分院地球化学研究所罗蒙诺索夫(И. С. Ломоносов)教授等。本项研究得到了中国国家自然科学基金(4941020720项,49772158项和49832005项)、国家攀登计划预选项目(95-预-39)和俄罗斯高等教育委员会的资助,马福臣教授、柴育成博士和刘丛强研究员给予了热情的鼓励与关心。在中国地质大学“211工程”学术著作出版基金的部分资助

下,本书得以及时付梓、面世。王焰新于1998年9月至1999年9月在加拿大滑铁卢大学工作期间, Eric J. Reardon教授提供了良好的研究条件和国际最新版本的水化学模拟软件。借此机会,向上述单位和个人致以衷心的感谢!

本书由中国地质大学王焰新执笔完成,俄方作者伊尔库茨克大学生态学实验室主任葛·马·斯贝泽尔(Г. М. Шпейзер)教授提供了俄罗斯和蒙古境内矿水部分观测资料和水化学计算结果,并与王焰新共同确定提纲和主要学术观点。尽管本书的写作时间前后持续了近5年,但由于著者水平所限,书中难免存在不足之处,热忱欢迎读者批评指正!

著 者

2000年1月8日

目 录

第一章 矿水形成的区域地质—水文地质背景·····	(1)
第一节 区域地质条件·····	(1)
第二节 区域水文地质背景·····	(9)
第二章 不同类型矿水的水化学性质 ·····	(14)
第一节 医疗矿水的分类 ·····	(14)
第二节 含氮热水 ·····	(19)
第三节 碳酸水 ·····	(35)
第四节 硫化氢热水 ·····	(43)
第三章 矿水的同位素组成及其环境信息分析 ·····	(44)
第一节 氢、氧同位素·····	(44)
第二节 氮同位素 ·····	(47)
第三节 锶同位素 ·····	(52)
第四节 硫同位素 ·····	(58)
第五节 铀同位素 ·····	(59)
第四章 矿水化学成分形成过程的地球化学分析 ·····	(64)
第一节 氧化还原反应:矿水中硫和铁的地球化学·····	(64)
第二节 碳酸水和含氮热水中锶的地球化学行为 ·····	(75)

第三节 矿水中氟的富集及其控制因素	(80)
第四节 硅在矿水中的迁移与富集	(85)
参考文献	(89)
英文摘要(English abstract)	(94)

第一章 矿水形成的区域地质—水文地质背景

第一节 区域地质条件

在全球大陆上分布着许多中生代形成的裂谷系或地堑系,较著名的有东非裂谷、莱茵地堑、贝加尔裂谷、山西裂谷等。由于这些裂谷系或地堑系的特征、演化和成因与大陆动力学、油气、煤炭、金属矿产和水资源等一系列重大地质—资源—环境问题紧密相关,因此引起了国内外地质界的广泛关注。本书所涉及的贝加尔和山西裂谷系,即为亚洲东部大陆上独具特色、具典型代表意义的大型地质构造。二者不仅地理位置接近,即均处于亚洲大陆东部,东经 110° 穿越二者的中段,在纬度上,二者各跨约 60° ,而且在区域地质条件上呈现出诸多相似之处。本节主要依据前人资料,从比较构造分析入手,简要论述二者的区域地质条件。

一、地貌特征

新生代以来复杂多样的地质作用,使得山西和贝加尔裂谷系形成了地形反差强烈、起伏交替显著的地貌景观。

山西裂谷系长约 $1\,200\text{ km}$,宽约 $50\sim 200\text{ km}$,由一系列河流谷地组成,主体是NE—NNE向,最低点仅 320 m (运城盐池湖面)。盆地东侧为东部和东南部山地,由北往南有恒山、五台山、系舟山、太行山、太岳山及中条山等,高程大多在 $1\,500\text{ m}$ 以上,大致沿NE—

SW 向展布,最高峰为五台山主峰北台,高程为 3 058 m。盆地西侧为西部高原山地,属吕梁山系,最高峰关帝山高程 2 831 m。

贝加尔裂谷系长约 2 500 km,宽 60~250 km,由一系列山间洼地组成,包括全球最深的内陆淡水湖——贝加尔湖(周边总长度约 2 000 km,最深处 1 620 m,位于海平面以下 1 181 m)。滨贝加尔湖地区的山系主要包括贝加尔山脉,西伯利亚中部高地,以及色楞金高原。山峰的高程一般均在 2 000 m 以下,但西部的穆恩库—萨德克(Мунку-Сардык)山,高达 3 491 m。

二、基本构造格局

山西和贝加尔裂谷系总体轮廓皆略呈 S 形,均由一群规模不等的地堑凹地与地垒凸起组成。个别构造多呈 NE 向,群体则沿 NNE 向展布。

山西裂谷系西邻鄂尔多斯块体,东为太行山隆起山地,南北两端分别为秦岭和燕山—阴山东西向构造带。根据徐锡伟等(1990, 1992)的研究,该裂谷系在空间上呈现出分段性,即组成山西裂谷系主体的 NNE 向剪切段和南、北两端的 NEE 向晋南、晋北两个张性区(图 1-1)。

受 NNE 向主干断裂控制的剪切段由大同盆地西部、忻定盆地西部的原平次级盆地、太原盆地、临汾盆地和运城盆地东部以及忻定、太原盆地间的石岭关隆起、太原、临汾盆地间的灵石隆起等组成。晋北张性区位于山西裂谷系北端东侧,区内地壳被一系列 NEE 向张性倾滑断裂切割成大小不同的长条状断块,产生一致的掀斜运动,组成了典型的盆岭构造,包括大同盆地以东的蔚县、灵丘盆地和繁代、定襄、阳原和浑源等次级盆地。晋南张性区位于山西裂谷系南端西侧,区内地壳也被一系列 NEE(或近 EW 向)张性倾滑断裂切割成长条状断块,产生一定的倾斜运动,形成不对称的地堑、地垒格局,主要包括侯马盆地、峨嵋台地和运城盆地。关于上述构造格局的形成机制,徐锡伟等(1992)认为,上新世以来,由于印度板块的向北推进,给华北地区施加以 NE—NEE 向推力,同

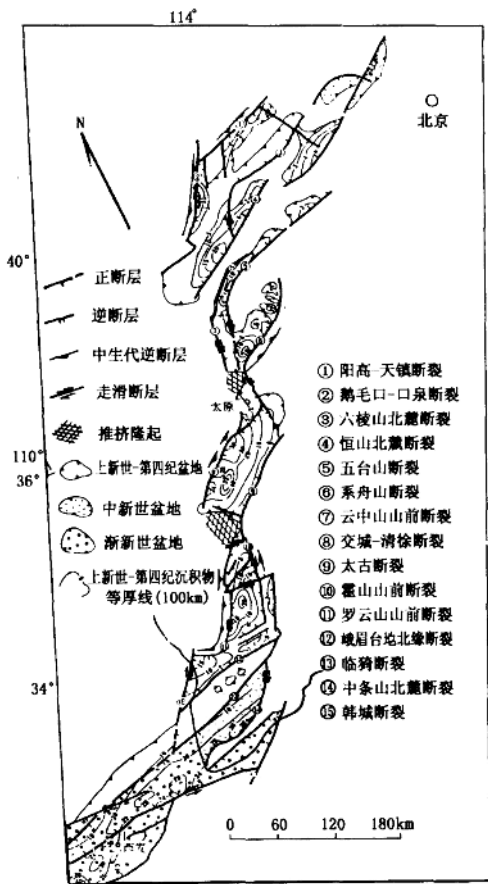


图 1-1 山西裂谷系盆地边缘断裂和各水文地质盆地上新世—第四系沉积物等厚图(据徐锡伟等,1992)

Fig. 1-1 Basin boundary rift faults and isopach map of Pliocene Quaternary sediments in hydrogeologic basins of the Shanxi rift system

时由于太平洋板块的俯冲和日本海等弧后盆地的扩张,使中国受到了 SWW 向挤压,从而导致华北地区产生了 NEE-SWW 向压应力。在此区域应力场作用下,会产生 NNE 和 NNW 向两组共轭剪切断裂。山西裂谷系剪切段即为 NNE 向右旋剪切带,南北两端的晋南、晋北张性区则是剪切带右旋运动所引起的尾端次级张性区。

贝加尔裂谷系位于西伯利亚地台东南缘,展布于伊尔库茨克弧形构造带的前弧附近及阿尔丹地块南侧两条区域性东西向构造带之间。与山西裂谷系相类似,也可分为三个段落:中央部位的贝加尔湖盆区,东北部拗陷区和西南部拗陷区(图 1-2)。中央部位

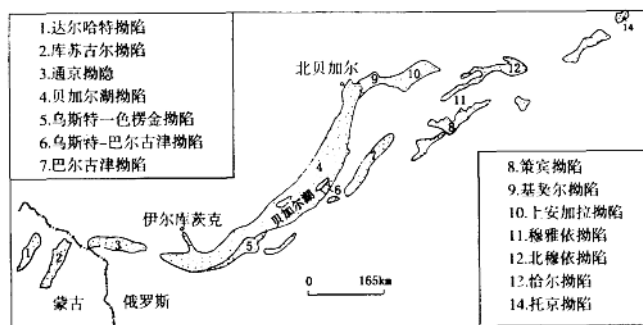


图 1-2 贝加尔裂谷系新生代拗陷(水文地质盆地)分布略图
(据 Степанов, 1989, 并补充)

Fig. 1-2 Cenozoic depressions (hydrogeologic basins) of the Baikal rift system

的贝加尔湖盆区包括三个拗陷,由南向北,拗陷的主体构造线从近 EW 向转至 NNE 向,湖底最深处见于中部拗陷。东北部拗陷区为几个总体沿 NE 向展布的盆地组成,包括上安加拉、穆雅坎 (Муяканский)、上穆依 (Верхнемуйский)、穆依 (Муйский)、恰尔 (Чарский) 和托京 (Токкинский) 等盆地。西南部拗陷区有三处盆地:近 EW 向的通京 (Тункинский) 盆地和位于蒙古人民共和国境内的 NNE 向的达尔哈特 (Дархатский) 盆地和库苏古尔湖裂谷。

为了解释上述构造格局的形成机制,Лукина(1988)较全面地总结了前人研究成果,在阐明制约贝加尔裂谷系各拗陷的主要断裂构造特征的基础上,分析了区域应力场(图 1-3),认为:由于印度板块与欧亚板块的碰撞,产生 SW 向的强大挤压,从而导致出现 SE 方向的拉张,形成中央部位的贝加尔湖盆区,以及 NWW 向的左旋剪切,形成裂谷系的“S”形盆地分布格局和一系列左旋剪切段。Лукина(1988)认为,这种解释尽管仍需进一步验证,但较合理地解释了贝加尔裂谷系深部地质特征。

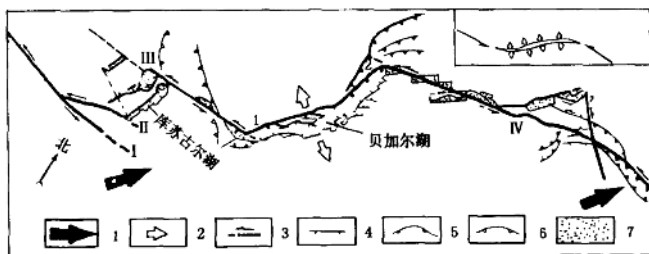


图 1-3 贝加尔裂谷系及邻近地带应力场和区域断裂分布图
(据 Лукина, 1988)

Fig. 1-3 Stress field and regional faults of the Baikal rift system and its neighboring areas

1. 区域挤压方向; 2. 局部拉张方向; 3. 平移断层 (I - 汗盖 (Хангайский), II - 车车尔列克 (Цэцэрлэгский), III - 贝加尔 - 蒙津 (Байкало - Мондинский), IV - 贝加尔 - 乌达冈 (Байкало - Удоканский)); 4. 正断层 (I - 滨海 (Приморский) 或奥布鲁切夫 (Обручевский), 2 - 北贝加尔); 5. 逆断层; 6. 挤压构造; 7. 拗陷中第四纪沉积物; 线的粗细对应于断裂的等级
右上角小图表示的是左旋剪切作用导致贝加尔裂谷系盆地呈“S”形空间展布

对比两个裂谷系区域应力场分析结果可发现,它们同为印度板块、欧亚板块和太平洋板块相互作用的产物。因此,大地构造环境的相似性是导致二者地质—水文地质条件相似性的决定性因素。

三、火山、地震活动

山西和贝加尔裂谷系的火山活动时期相近:自始新世或渐新

世至第四纪。火山岩的化学成分较单一,以碱性玄武岩为主。

晋北及其邻区是山西裂谷系唯一有新生代火山活动的地区。自渐新世至更新世,碱性玄武岩于繁峙等地多次喷溢,厚度可达 800 m 以上。第四纪的大同火山群,岩性亦为碱性玄武岩,时代为更新世。徐锡伟等(1992)认为,大同火山群明显受晋北张性区 NEE 和 NW 向断裂控制,因而是晋北张性区地壳局部性伸展之产物。

贝加尔裂谷系的火山活动范围要大得多,主要发育于其西南部和东北部,其中央部位未见火山岩。裂隙式喷发形成的总厚度达 500~600 m 的玄武岩,在裂谷系的凸起部位为“高原玄武岩”,在拗陷内部为熔岩荒原。西南部的玄武岩形成时代始于中新世,东北部的始于晚更新世—第四纪初期。Грачев(1987)把西南部通京拗陷及邻近地区的火山活动划分为两个阶段。在第一阶段(中新世—中上新世),火山活动呈“弥散”特征,即不集中分布于某一部位,这与张性应力场应力不集中有关。在第二阶段(晚上新世—第四纪),火山活动集中发育于通京拗陷内部及吉特(Джид)河上游。这一阶段对应于贝加尔裂谷系构造活动增强、断陷两侧山体增长和裂谷盆地加深时期。几乎全部的构造活动都集中到了通京拗陷及通京线性构造区。对贝加尔系东北部火山活动的研究也揭示了与上述类似的随着裂谷作用的发展,火山活动向拗陷区(或狭义的“裂谷区”)集中的时空发育规律。

山西是东亚大陆区地震活动较强烈、频繁的地带。公元前 231 年以来,共有 2 次 8 级,4 次 7~7.9 级和 17 次 6~6.9 级地震发生。 $M_s \geq 7$ 的地震主要发生在 NNE 向的临汾、忻定盆地及其北部边界附近,地震强度大而频度低。 $6 \leq M_s \leq 7$ 的地震主要发生在 NEE 向的大同、太原和运城盆地区,其强度相对较低,但频度高(黄福明等,1992)。

贝加尔裂谷系是世界著名的地震带。如在其西南部的贝加尔—蒙津断裂带,1814—1950 年间,就发生过 5 次 6 级以上的强烈地震。又如在东北部穆依拗陷的南穆依断裂带,于 1957 年发生了

7.9级大地震,而沿其邻近地带的乌达冈断裂带,在1961—1964年的5年间,就发生过50次以上的不同强度的地震(Лукина, 1988)。

四、前新生代基岩岩性

在山西裂谷系盆地及其边山,除缺失志留系、泥盆系、上奥陶统和下石炭统外,从下太古界至新生界其余各时代地层均有出露。这里,首先将前新生代基岩岩性简要总结如下。

下太古界由各种麻粒岩、片麻岩、斜长角闪岩和大理岩等中深变质岩组成。上太古界下部由石英岩、大理岩、黑云母变粒岩类角闪岩、二云石英片麻岩以及酸性、基性变质火山岩等组成,上部主要由片麻岩、变粒岩类斜长角闪岩、磁铁矿石岩和大理岩组成。下元古界的一套浅变质岩系,主要由变质砾岩、石英岩、板岩、白云岩以及页岩、泥灰岩和千枚岩组成。上元古界包括长城系及蓟县、青白口和震旦系,长城系由石英砂岩、石英岩状砂岩夹紫红色页岩、含燧石白云岩组成。蓟县系主要为富含硅质及燧石条带的白云岩组成。青白口系主要为一套燧石角砾岩层,部分地区可见铁质砂岩和石英砂岩。震旦系厚度不稳定,为冰碛成因的砾岩和含砾泥岩。上述前寒武系地层主要分布于五台山、吕梁山、中条山、太行山等山区。古生界地层在境内广泛分布,主要包括寒武系和奥陶系下、中统碳酸盐岩,中、上石炭统铝土岩、砂页岩、灰岩和煤层,以及二叠系陆相碎屑岩、粘土岩和煤层。中生界三叠系、侏罗系、白垩系为陆相盆地堆积的中细粒砂岩及粉砂岩,在侏罗系和白垩系中局部有粗粒沉积岩及少量火山喷发岩。

山西境内的岩浆活动较为频繁,尤以五台山期、吕梁期和燕山期岩浆活动最为强烈,所形成的岩浆岩类型也较为复杂,超基性、基性、中酸性、酸性、碱性和偏碱性岩浆岩均有发育。

与山西相比,贝加尔裂谷系的地层出露较不完整,尤其是古生界,仅出露了寒武纪地层。在该裂谷系的绝大部分地区,基底岩石为前寒武系的古老变质岩系,由片麻岩、片岩、角闪岩和大理岩组

成的太古代变质岩广泛分布于裂谷带的西南部、中部和贝加尔湖的东岸。在其南部,发育太古代—元古代的片麻岩和板岩,局部见大理岩和石英岩。上元古代的变质砂岩、粘土岩和碳酸盐岩广泛分布于贝加尔地区的西部和北部。寒武系地层主要由碳酸盐岩组成,包括灰岩、白云岩、泥灰岩,局部还可见砂岩、页岩及喷发岩。寒武系地层主要发育于西南部和西北部,中生代地层见于西伯利亚地台南缘,岩性为弱胶结的砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩及煤层。

除新生代玄武岩外,贝加尔裂谷系还广泛发育各时代的侵入岩,主要包括花岗岩、正长岩和闪长岩。

五、新生代沉积特征

如前所述,两个研究区均为新生代时期形成的裂谷系。因此,在每个断陷盆地中,均堆积了一定厚度的新生代地层。

在山西裂谷系,除运城盆地堆积了巨厚的下第三系外,其余各盆地均无下第三系堆积。但上第三系广泛分布,并以不整合形式直接覆盖在不同时代的基岩上。其岩性主要是半胶结的河湖相碎屑岩、泥岩和泥灰岩。第三系地层厚度横向变化较大,同期异相现象明显。第四系分布广,出露全,与第三系呈不整合或假整合接触关系。晚更新世晚期以前,为一套湖相或河湖相沉积,岩性主要为粘土、砂质粘土、砂及砂砾石层。如前所述,第四纪时期晋北地区火山活动频繁。在大同盆地,玄武岩层常与湖相层相间出现。运城盆地至今仍残留一些现代湖泊堆积。

贝加尔裂谷系断陷盆地新生代沉积物可划为四套(Грачев, 1987):含煤岩系(中新世—早上新世),含赭石岩系(晚上新世),凝灰—沉积岩系(晚上新世—早更新世),和砂质岩系(中—晚更新世—全新世)。新生代地层剖面之建立大多依据钻探资料。其中,中新世沉积物大多为砂与粘土互层,局部为含煤层。上新世沉积物在通京拗陷区广泛分布,主要为粉砂、砂和砂砾石,火山成因沉积物也很常见,一般占总厚度的 $1/10 \sim 1/4$ 。第四纪沉积物的成分和成因复杂多样,厚度较大,与上新统相比,第四纪冲积物分选性

较好,主要是砂、砾和漂砾,几乎不含粉砂和粘土。

此外,在贝加尔裂谷系西侧的东萨彦岭和东北部地区,分布有大片的多年冻土。

第二节 区域水文地质背景

一、气象、水文

山西地处温带季风气候区,冬季时间长而干冷,夏季温热多雨,降水集中在7月、8月和9月(占全年降水量60%左右),春、秋两季时间较短。多年平均气温介于 $4\sim 14^{\circ}\text{C}$ 之间,北部较低,右玉年均气温 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$,南部较高,运城年均气温 14°C 左右。丘陵、山地的年均气温低于盆地区,如忻州盆地内与五台山中台顶的年均温差达 12°C 。区内年均降水量 $400\sim 600\text{ mm}$,由东南向西北递减。蒸发量多年平均 $1\,000\sim 2\,000\text{ mm}$,山区低于盆地区,运城盆地高达 $2\,000\text{ mm}$ 以上。

山西境内的河流分属黄河与海河两大水系,黄河水系包括吕梁山脉南、西两麓发育的河流及太岳、中条山发育的河流,汾河为其最大支流。海河水系在境内的支流包括桑干河、滹沱河、漳河等。此外,区内发育一些内陆湖泊,如运城的盐池等断陷盆地湖泊和宁武山地的公海等山地湖泊。

贝加尔裂谷系位于温带大陆性气候区。受西伯利亚高压反气旋的影响,冬季(自10月至次年3~4月)气温低(最低气温可达 -57°C),少云,无强风。在春季,主要来自西北方向的旋风将冷空气带走,故出现强冷风;至夏季,此过程减弱,6~9月的降水量与全年降水量的70%~80%。该地区的湿度较大,高山区的年降水量可达 $1\,300\text{ mm}$,全区年均降雨量在 $400\sim 700\text{ mm}$ 之间。库苏古尔湖地区则是蒙古境内最潮湿的地区,其北部的泰加林山区年均降雨量 $430\sim 450\text{ mm}$,南部的山前草原地带年均降雨量也达 300 mm 。