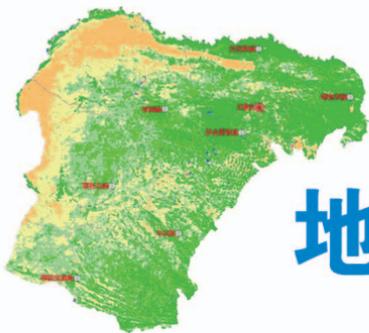




中国地质调查成果
CGS 2015-024

中国地质调查“鄂尔多斯盆地北部地下水循环与合理开发利用研究”项目资助



鄂尔多斯盆地 地下水补给研究

尹立河  编著

EERDUOSI PENDI
DIXIASHUI BUJI YANJIU



黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯盆地地下水补给研究 / 尹立河编著. — 银川 : 阳光出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5525-2337-9

I. ①鄂… II. ①尹… III. ①鄂尔多斯盆地—地下水补给—研究 IV. ①P641.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第312406号

鄂尔多斯盆地地下水补给研究

尹立河 编著

责任编辑 屠学农

封面设计

责任印制 岳建宁

黄河出版传媒集团 出版发行
阳光出版社

地址 宁夏银川市北京东路139号出版大厦 (750001)

网址 <http://www.yrpubm.com>

网上书店 <http://www.hh-book.com>

电子信箱 yangguang@yrpubm.com

邮购电话 0951-5014124

经销 全国新华书店

印刷装订 宁夏凤鸣彩印广告有限公司

印刷委托书号 (宁)0000071

开本 880mm×1230mm 1/32

印张 3.25

字数 80千字

版次 2015年12月第1版

印次 2015年12月第1次印刷

书号 ISBN 978-7-5525-2337-9/P·17

定价 25.00元

版权所有 翻印必究

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 选题背景与研究意义	(1)
1.2 地下水补给的研究进展	(2)
1.3 研究内容与技术路线	(9)
1.4 主要成果及创新点	(11)
第2章 研究区概况	(12)
2.1 地形地貌	(12)
2.2 气候特征	(13)
2.3 水文特征	(15)
2.4 植被与土壤	(16)
2.5 地质概况	(18)
2.6 水文地质概况	(20)
第3章 原理与方法	(25)
3.1 稳定同位素测法	(25)
3.2 氯元素守恒法	(26)
3.3 水均衡方法	(28)
3.4 达西定律法	(29)
3.5 水位动态法	(30)
3.6 经验法	(31)
3.7 基流分割法	(32)
3.8 包气带水分数值模拟方法	(32)
第4章 基于多种方法的地下水补给量估算	(35)
4.1 稳定同位素	(35)

4.2 氯元素守恒法	(42)
4.3 水均衡方法	(45)
4.4 达西方法	(53)
4.5 水位动态法	(55)
4.6 经验法	(59)
4.7 基流分割法	(60)
4.8 包气带水流数值模拟法	(66)
第5章 地下水补给量估算对比	(71)
5.1 方法对比	(71)
5.2 系统对比	(75)
第6章 地下水补给量估算方法的选取原则	(78)
6.1 地下水补给量估算方法优缺点概述	(78)
6.2 地下水补给量估算方法的空间尺度	(82)
6.3 地下水补给量估算方法时间尺度	(83)
6.4 地下水补给量估算方法精度	(84)
6.5 地下水补给量估算方法选取原则	(85)
第7章 结论	(90)
参考文献	(92)

第1章 引言

1.1 选题背景与研究意义

地下水补给是指含水层或是含水系统从外界获得水量的过程(王大纯等,1995)。地下水的补给量反映了含水层的可更新能力,是地下水资源管理与合理开发利用的关键参数(Nimmo等,2005)。定量评价地下水的补给量是研究大尺度水文循环过程的基础,是实现地下水可持续开发利用的关键,是地下水数值模拟的核心源汇项,是进行含水层易污性评价和地下水污染治理的重要参数,是水文地质学中一个重要的基础科学问题(Scanlon等,2002;马金珠等,2007)。事实上也只有解决好了含水层的补给问题,才能实现对地下水资源的可持续开发利用。尽管中外科学家在此领域进行了大量的研究,包括使用同位素、原位试验技术和数值模拟等方法,由于地下水的补给具有高度的时空非均质性,问题还远未得到解决(Healy and Cook,2002; Scanlon等,2002; Missstear等,2009)。特别是在干旱和半干旱地区,由于地下水的补给量非常小,定量评价地下水的补给尤为困难。中国西北地区地处干旱—半干旱地区,地表水资源贫乏,地下水是重要的(局部地区为唯一的)供水水源(李文鹏和郝爱兵,1999;孙建平等,2007)。地下水资源是我国西北地区经济发展、居民生活水平提高的重要保障。随着地区经济的发展,特别是近年来能源基地的建设,地下水开发程度不断提高,迫切需要对区域地下水资源进行有效管理。因此,研

究含水层的补给,对实现地下水资源的合理开发利用具有重要的理论和实际意义。

鄂尔多斯高原地处西北地区的东部,区内蕴藏着丰富的能源和矿产资源,是国家级的能源基地。区内的矿产资源包括煤炭、天然气和盐岩等,其中天然气探明地质储量为 $1.34 \times 10^{13} \text{m}^3$,占全国总储量的50%,是我国新兴的能源化工基地和21世纪重要的能源接续地(侯光才,2008)。但由于区内降水稀少,蒸发强烈,地表水资源缺乏,地下水是最重要的供水水源。随着能源基地建设和区内工业的发展,对地下水资源的需求将不断增加。加之区内生态环境脆弱,分布有依赖地下水的植被,要实现基于生态安全的地下水可持续开发利用,就必须对地下水的补给量进行研究。

1.2 地下水补给的研究进展

1.2.1 概念与机理

国际水文地质界对地下水的补给有不同的定义。在土壤学中,常用 Infiltration, Drainage 或是 Percolation 来表示根系之下的土壤水的入渗(Lerner, 1997),其入渗量通常情况下等于地下水的补给量,但有时也可能到达不了潜水位,因引有些学者将此定义为潜在补给(Potential Recharge)。相对于潜在补给,对于引起地下水水位上升的补给,称为实际补给。地下水的补给有三种类型:直接补给(Direct Recharge)、间接补给(Indirect Recharge)和局部补给(Localized Recharge)(图1-1)。直接补给是指降雨在大范围内直接下渗补给地下水;间接补给是指通过地表水体渗漏补给地下水;局部补给是指通过小型洼地的积水入渗间断性补给地下水。

实际上,这三种补给方式可能会同时存在。在每一种补给方

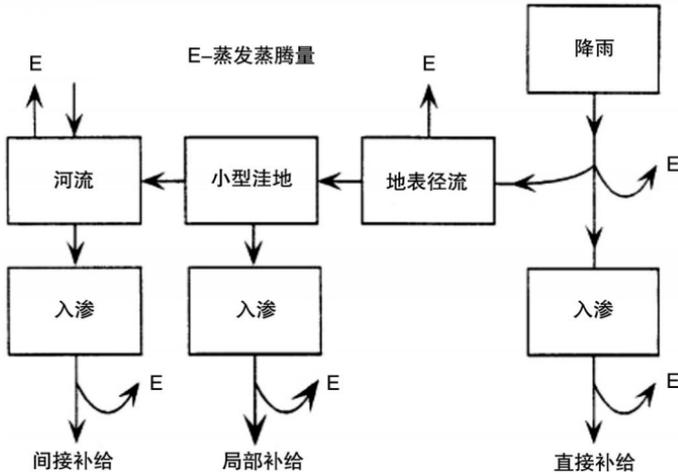


图 1-1 地下水补给机理(据 Lerner, 1997)

式中,存在三种下渗模式。第一种下渗模式是活塞式下渗模式,第二种模式是通过大空隙下渗,第三种模式是优先通道下渗模式。一般来说,随着干旱程度的增加,直接补给逐渐变为次要的补给形式,而间接补给和局部补给成为主要的补给形式。

1.2.2 主要方法

自 20 世纪 80 年代中期,国际水文地质界逐渐认识到定量研究地下水补给的重要性,地下水补给研究进入高峰期(De Vries 和 Simmers, 2002),定量研究地下水补给的方法变得越来越丰富,并逐渐实现了从单一应用一种方法到综合应用多种方法的转变。国际机构和非政府组织资助了大量的地下水补给研究,并相继召开数次有关地下水补给的国际专题学术会议,其中包括:

1988 年:地下水天然补给国际学术会议;

1989 年:地下水补给国际研讨会;

1990年:地下水补给国际会议(主题为:对地下补给的理解与确定);

1995年:定量确定地下水的补给量;

1997年:干旱/半干旱地区潜水含水层的补给。

在干旱和半干旱地区,地下水的补给研究是地下水资源评价的重要组成部分,因此各国科学家在此领域进行了大量的研究。据 Scanlon 等(2006)年统计,世界上共在 97 处干旱和半干旱区开展了地下水的补给研究,主要集中在美国和澳大利亚(图 1-2)。

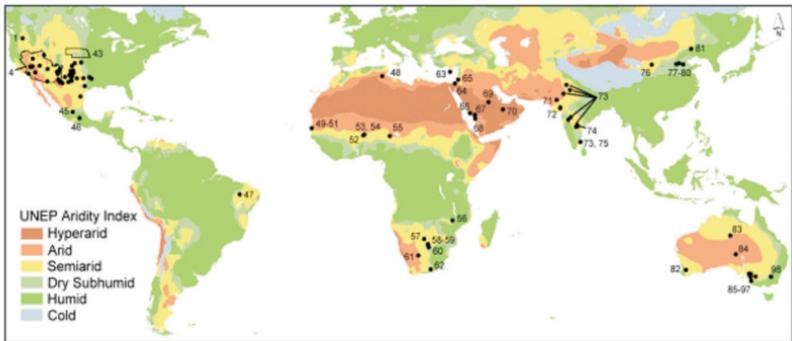


图 1-2 全球干旱/半干旱地区地下水补给研究区分布图(据 Scanlon, 2006)

由于地下水补给的复杂性,各国科学家提出了多种确定地下水补给的方法,下面以各种方法为主线,论述国内外研究现状及发展趋势。

水均衡方法

水均衡法是最为通用的一种估算地下水补给量的方法(Lerner 等, 1990)。该方法是一种间接方法,在水均衡方程中除了地下水补给为未知量外,其余各均衡项均为已知量,其差即为地下水的补给量。大量的研究证明,以水均衡为基础的地下水补给评价方法在降水量很小而蒸发强度极大的干旱/半干旱地区可信度较差(马

金珠等,2003)。主要是因为干旱/半干旱区,地下水的补给量很小,各均衡项本身的测量和估算误差要远大于地下水的补给量(De Vries 和 Simmers, 2002)。但是如果将时间步长缩短,就能大大减小蒸发量估算的误差对地下水补给量估算的影响。如Howard 和 Lloyd(1979)指出,当计算的时间段小于10天时,蒸发量估算的误差相对较小。以天为计算单位,Sophocleous(1991)表明均衡法可以得出与地下水水位波动法相近的结论。

基流分割法

当河流接收地下水补给时,可利用基流分割法确定地下水对河水的补给量(Rutledge, 1997; Halford and Mayer, 2000)。尽管地下水的排泄量与地下水补给具有密切的关系,但是二者并不完全相同,地下水也可能通过其他途径排泄(如蒸发蒸腾、开采和越流补给深层地下水)。目前有多种方法可以进行基流分割,包括流量曲线分割法(Sloto and Crouse, 1996)、化学分割法(Hopper等, 1990)、退水曲线位移法等。基流分割法最大的问题在于没有考虑到地下水对降雨的响应,仅从地表水流量曲线的角度机械的分割地下水的排泄量。利用水化学和同位素技术进行的基流分割能更接近真实情况,但是这两种方法需要进行大量的采样工作,费用较高。

流域数值模拟方法

利用分布式流域模型可以计算大尺度的地下水补给量,地下水的补给量是通过水均衡方程计算出的(Singh, 1995)。目前流域模型主要有两种,一种是集中式流域模型,这种模型对每个流域只能计算出一个补给量;另一种是分布式流域模型,这种模型将流域划分为若干个水文响应单元,计算每一个单元的地下水补给量。有些学者还将流域模型(如SWAT)和地下水模型(MODFLOW)结

合起来,将流域模型估算的补给量直接输入到地下水模型中,经过不断的调整,可以获取到比较准确的地下水补给量的空间分布。

零通量面法

零通量面是指土壤中通量为零的面,它是土壤水蒸发和入渗的分界面,其下的土壤水最终可以到达潜水面,补给地下水。该方法最早由 Richards 等人(1956)提出,此后得到了广泛使用(Healy 等, 1989)。该方法最大的不足之处是当土壤水全部向下运移时,就无法用零通量面法计算地下水的补给量,因为此时无法确定零通量面的位置。

蒸渗仪法

蒸渗仪法通过测量土柱下渗量确定地下水的补给量,是一种直接测量地下水补给量的方法(Ward and Gee, 1997)。这种方法可以比较准确的确定地下水的补给量,特别是补给量比较小时,是一种最为直接和有效的办法。蒸渗仪表面可以有植被,用以研究不同的植被和植被覆盖条件变化对地下水补给的影响。如果蒸渗仪的底部位于植被的根系层之上,利用蒸渗仪法计算的地下水补给量偏大。但是蒸渗仪的建设和维护需要大量的人力和物力,需要连续观测数年才能估算出多年的地下水平均补给量。

达西定律法

达西定律适用于包气带和饱和带,其中用于包气带计算地下水的补给量最为广泛。将达西定律应用于包气带计算地下水的补给量时,需要测量包气带的垂向水力梯度和渗透系数,是一种在干旱和半干旱地区广泛使用的计算地下水补给量的方法(Sammis et al., 1982)。达西定律法的难点是确定渗透系数的空间分布和获得可靠的水力梯度值(Belan and Matlock, 1975),特别是进行大尺度的地下水补给量研究时,如何获取这些信息是成功应用达西定律

的关键。利用达西定律法可以计算大尺度含水层的补给(大于10000 km²)。含水层的渗透系数通常利用抽水实验获取,如Sibanda等(2009)在利用达西定律计算津巴布韦Nyamandhlovu地区地下水的补给量时,就是利用抽水实验得出了含水层的渗透系数。

氯元素守恒法

氯元素守恒自Eriksson和Khunakasem(1969)提出以来,迅速成为干旱/半干旱地区估算地下水补给量的最有效的方法之一(马金珠等,2005)。氯元素守恒法可以用于包气带,也可以用于饱和带,当用于包气带时可以用于记录气候变化对地下水补给的影响。其基本原理是降雨中的氯元素总量与地下水中的一致,因此只要测出降雨和地下水的氯元素的含量,就可以计算出地下水的补给。这种方法最大的限制在于无法准确地确定大气中灰尘的氯元素含量,Selaolo(1998)研究结果表明,大气灰尘的氯元素含量具有强烈的年际变化。最近Subyani和Zekai(2006)完成了对氯元素守恒法的改进,他们将摄动方法引入到氯元素守恒法中,提高了估算的精度。

放射性同位素法

利用放射性同位素计算地下水的补给主要包括氡、碳-14和CFCs。氡和CFCs在大气中含量的升高是由人为原因导致的,通过确定地下水或是包气带中与这一高值相对应的深度,就可以用来估算近50年来地下水补给量(Cook等,1994)。近年来,随着大气中CFCs含量的增加,利用CFCs计算地下水的补给越来越受到重视,而氡在大气中的含量在逐渐降低,可利用性也在随之降低(Scalon等,2002)。利用¹⁴C可以估算古补给,因为¹⁴C可以确定500~20000年的地下水年龄。一般来说,放射性同位素应在地下水的分水岭地区使用,因为在这些地区,地下水以垂向运动为主。

地下水水位动态法

地下水水位动态法是一种传统的确定地下水补给量的方法,最早应用的实例可以追溯到 20 世纪 20 年代(Meinzer, 1923; Meinzer and Stearns, 1929)。只要确定出地下水的上升量和含水层的给水度,就可以利用该方法确定地下水的补给量(Healy and Cook, 2002),是一种广泛使用的确定地下水补给的方法。这种方法的优点是不需要知道地下水的补给机理,因此优先流的存在不会限制它的使用。限制这种方法使用的因素主要包括缺乏高精度的地下水动态资料和可靠的含水层给水度。获得可靠的给水度是成功应用地下水水位动态法的重要保障,目前主要是通过抽水试验获取。

稳定同位素方法

稳定同位素(H^2 和 O^{18})也可以用来定性研究地下水的补给,通过对比地下水和大气降水的同位素组成,可以确定地下水的来源和地下水的补给机理(Coplen 等,2000)。利用降水和地下水稳定同位素的特征研究地下水与大气降水的关系在干旱和半干旱地区得到了广泛应用,在这些地区,地下水大多起源于大气降水。在有些地区,洪水也会对地下水产生补给,如在南非的 Kalahari 地区(Verhagen, 1984)和以色列(Levin 等,1980)。在降雨的入渗机理方面,土壤水的同位素组成可以确定植被对地下水补给的影响(Zimmerman 等,1967)。利用稳定同位素还可以研究地下水的补给机理,查明地下水入渗是以活塞入渗为主,还是以优先通道式的入渗为主。

1.2.3 发展方向

地下水补给研究的发展方向是与地球物理和遥感技术融合,

来解决地下水补给的时空非均质性。许多的地球物理方法可以提供与地下水补给有关的数据,比如利用重力、地震和电磁等物探方法可以计算出含水量。比如连续开展高精度重力调查,可以确定由于补给而造成的物质变化(Pool 和 Schmidt, 1997)。利用其他物探方法,如地震和穿地雷达可以反演地下水补给引起的潜水位变化(Haeni, 1986; Bohling 等, 1989)。除了地面物探以外,多孔测井可以计算由于补给引起的水分重新分布(Daily 等, 1992)。将物探方法与氯元素守恒法相结合是一种非常有前景的方法组合,利用频域电磁法和氯元素相结合,国外一些学者成功解决了地下水补给的空间变异性,确定了大尺度地下水的补给量(Cook 等, 1992; Salama 等, 1994; Scanlon 等, 1999)。

另一种重要的方法是遥感方法,尽管现在还不是一种非常定量化的方法,但是它可以查明大尺度补给的空间变化特征,这是目前的方法无法实现的。基于遥感的水均衡研究是一种非常有前景的方法,因为目前遥感方法已比较好的解决了降雨和蒸发的大尺度计算问题。比如有些学者将基于遥感的水均衡方法与氯元素守恒法相结合,计算了波斯瓦那地区地下水的补给量(Burner 等, 2004)。尽管还有某些缺陷,但是遥感方法能够从区域层面上了解水均衡,如果采用高频率的计算,那么遥感方法有可能解决地下水补给估算中的一个难题,也就是无法确定大尺度地下水补给的时空变化规律。因此,随着遥感技术的不断发展,利用遥感技术方法估算地下水补给量将成为一个重要的研究方向。

1.3 研究内容与技术路线

20世纪80年代以来,前人在鄂尔多斯高原地区开展了地下水补给研究,先后利用了经验方法(侯光才等, 2008)和包气带水流数

值模拟方法(黄金廷,2006)确定了地下水的补给量。为了保持整个研究内容的完整性和方便研究结果的对比研究,本次研究融合了前人已完成的成果。

本次研究的总体思路是:首先利用降雨和地下水的氢氧稳定同位素确定地下水的补给源和补给机理;然后以多方法、多视角、多尺度为总的工作布置思路定量研究地下水的补给量(图1-3)。多方法是指综合运用多种地下水补给量的方法,多视角是指从地表水角度、包气带水角度和地下水角度研究地下水的补给量,多尺度是指从局部尺度和区域尺度来研究地下水的补给量。采用7种方法进行地下水补给的定量研究,包括氯元素守恒法、地下水水位动态法、基于饱和带和包气带的达西定律法、基于遥感的水均衡方法、经验法和基流分割法。在这7种方法中,基于遥感的水均衡方法和基流分割方法从地表水的角度研究地下水的补给量;包气带数值模拟方法从包气带水的角度研究地下水的补给量;氯元素守恒法、地下水动态方法和达西定律和经验法从地下水的角度研究地下水的补给量。从多尺度的角度出发,包气带数值模拟、氯元素守恒和水位动态法主要是从点上研究地下水的补给量,而基流分割、基于遥感的水均衡法和达西定律及经验法主要是从区域的角度研究地下水的补给量,最后通过点上研究成果与区域研究成果

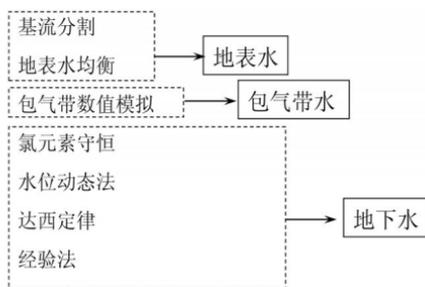


图1-3 鄂尔多斯高原地下水补给研究技术路线

的结合,确定研究区的地下水的补给量。在前人研究的基础上,结合国内外的研究实例,总结了常用的地下水补给方法的时空特点和选取原则。

1.4 主要成果及创新点

(1)根据降雨和地下水的氢氧同位素特征,研究了地下水的补给源和补给机理,查明了鄂尔多斯高原地下水获得补给的主要方式。

(2)综合采用7种方法,从地表水、包气带水和地下水的角度定量计算了地下水的补给量,降低了地下水补给量估算的不确定性。通过对比鄂尔多斯高原地下水补给量的计算结果,分析了不同方法估算出的地下水补给具有差异的原因,确定了区内九大地下水系统地下水的补给量。

(3)在综合国内外研究的基础上,系统总结了地下水补给估算方法的空间尺度、时间尺度和精度,提出了选取地下水补给量估算方法的基本原则,评价了目前16种主要的地下水补给量估算方法。

第2章 研究区概况

2.1 地形地貌

研究区地处鄂尔多斯盆地北部,属我国二级台地内蒙古高原的一部分,地形高程总体在1000~1500m之间,总体地势西高东低(图2-1)。由剥蚀梁峁、河谷、湖盆、沙丘沙地、滩地等地形组成。海拔高程多在1100~1500m,相对高差30~80m,地形起伏较平缓。最高点为高原中央的大额尔和图,海拔1616m。最低点位于东南缘的无定河河谷,高程约1000m。沙漠高原分布于南部的毛乌素沙地和北部库布其沙漠地区,波状高原分布于沙漠高原、西缘低山区和东部丘陵沟壑区所围地区。本区地形总体上四周低中央高,西北部略高于东南部。以中央的塔布乌素高地为中心,梁地总体上呈放射状展布。海拔较高的梁地有新召梁、东胜—四十里梁、鄂托克梁、后大梁、大庙梁,较低的梁地有亚斯图梁、乌兰陶勒盖梁、嘎拉图庙梁、玛拉迪庙梁。其中,规模最大的新召梁、东胜—四十里梁和鄂托克梁以塔布乌素高地为中心呈三叉状将高原分成了三部分,使地形分别向北、西和东南方向倾斜。这三道梁同时构成了区域上最大的3条地表分水岭,控制着区内水系的总体走向。在上述大梁之间,还有更低的横向梁地,形成一个蛛网状的梁地格局。梁地间的洼地中,或发育湖盆,或发育河谷,或发育滩地。这些大大小小的梁地构成的分水岭,将整个高原区水系分割成内流区和外流区,同时对地下水径流具有控制作用。

总体表现为高原地貌特征,其形成主要受新构造运动控制。本区历经燕山运动和喜山运动后,由古盆地抬升演变为现代高原。第四纪以来,在强烈的风蚀作用和流水侵蚀下,中西部地区形成地形起伏较平缓的波状高原和沙漠高原地貌景观,东部形成丘陵沟壑地貌景观。按区内地貌形态和成因类型,主要可划分为山地、波状高原、沙漠高原、丘陵沟壑四种地貌类型。

2.2 气候特征

本区属典型的温带大陆性气候。其特点是:冬季严寒而漫长,夏季温热而短暂,寒暑变化剧烈;降水量少而集中,蒸发强烈,光照资源丰富;多大风,风速和频率均大于同纬度的其他地区,沙尘暴日数较多。

2.2.1 气温

气温是反映气候变化的主要因子,气温与降水和蒸发密切相关,是影响地下水补给与排泄的重要因素。本区年平均气温为 $5.3^{\circ}\text{C}\sim 9.2^{\circ}\text{C}$,具有从南到北、从东至西逐渐降低的趋势。南部的鄂托克前旗年平均气温 8.7°C ;中部的鄂托克旗 7.93°C ,乌审旗 8°C ;北部的杭锦旗 6.5°C ,东胜 7.4°C 。高原中部隆起的水岭地带,因海拔较高($1400\sim 1500\text{m}$)而产生了年平均温度的低值区,一般在 $5.3^{\circ}\text{C}\sim 5.9^{\circ}\text{C}$ 之间。以此向四周延伸,气温随着高度的降低而升高。

2.2.2 降水

根据区内及其周边地区 10 余个气象台(站)1961~2008 年近 47 年的降水资料综合分析,多年平均降雨量介于 $420\sim 160\text{mm}$ 之间,且由东南向西北递减(图 2-2)。降水量年内变化大,分配极不