

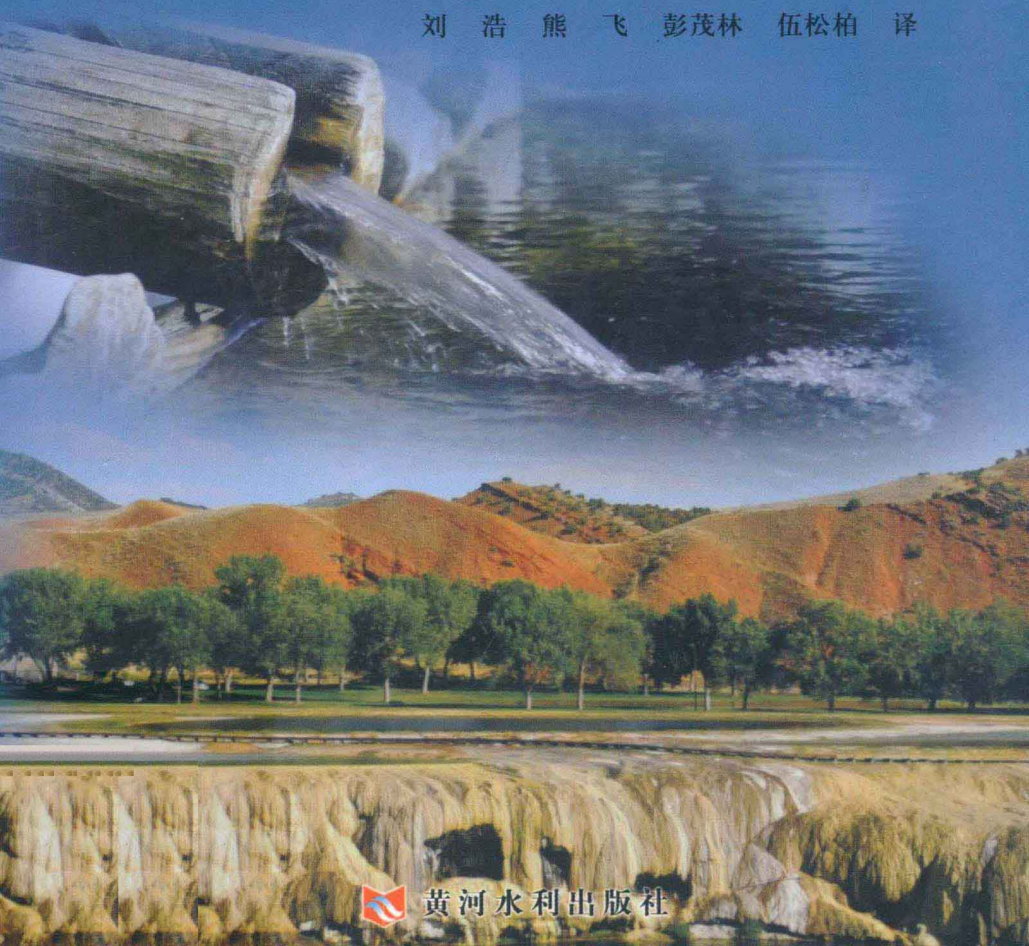
Mc
Graw
Hill Education

地下水资源的可持续性、 管理和修复 (中)

GROUNDWATER RESOURCES
Sustainability, Management, and Restoration

(美) Neven Kresic 著

刘浩熊 飞 彭茂林 伍松柏 译



黄河水利出版社

Groundwater Resources Sustainability,
Management, and Restoration

地下水资源的可持续性、管理和修复

(美) Neven Kresic 著

刘 浩 熊 飞 彭茂林 伍松柏 译

(中)



黄河水利出版社

· 郑州 ·

Neven Kresic

Groundwater resources: sustainability, management, and restoration

ISBN: 978 - 0 - 07 - 149273 - 7

Copyright © 2009 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Yellow River Conservancy Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan. Copyright © 2012 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Yellow River Conservancy Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和黄河水利出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权©2012 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与黄河水利出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

著作权合同登记号:图字 16 - 2012 - 179

图书在版编目(CIP)数据

地下水资源的可持续性、管理和修复/(美)内文·克雷希克
(Kresic, N.)著;熊军等译. — 郑州:黄河水利出版社,2013.2

书名原文:Groundwater resources: sustainability, management,
and restoration

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0161 - 2

I. ①地… II. ①克… ②熊… III. ①地下水资源 -
水资源管理 - 研究 IV. ①P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 317719 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:29.5

字数:850 千字

印数:1—1 800

版次:2013 年 2 月第 1 版

印次:2013 年 2 月第 1 次印刷

定价(上、中、下):70.00 元

目 录

译 序	翁立达
译者的话	
前 言	
第 1 章 全球淡水资源及利用	(1)
1.1 世界的水资源	(1)
1.2 淡水的可获性	(10)
1.3 水利用趋势及其案例	(12)
1.4 水短缺	(32)
1.5 水事纠纷	(38)
1.6 水经济	(42)
1.7 可持续性	(66)
参考文献	(71)
第 2 章 地下水系统	(85)
2.1 定 义	(88)
2.2 地下水系统的几何形状	(93)
2.3 地下水储存	(95)
2.4 水平衡	(110)
2.5 地下水流	(122)
2.6 初始条件与边界条件	(146)
2.7 含水层类型	(162)
2.8 滞水层	(199)
2.9 泉 水	(207)
2.10 海岸地区地下水与含盐地下水	(228)
参考文献	(237)
第 3 章 地下水补给	(254)
3.1 地下水补给情况简介	(254)

3.2	降雨—径流—补给的关系	(255)
3.3	蒸发蒸腾 (<i>ET</i>)	(260)
3.4	入渗及包气带内水分运动	(265)
3.5	影响地下水补给的因素	(271)
3.6	估算地下水补给的方法	(280)
	参考文献	(304)
第4章	气候变化	(315)
4.1	气候变化简介	(315)
4.2	自然气候循环	(316)
4.3	人为气候变化	(337)
	参考文献	(349)
第5章	地下水水质	(353)
5.1	地下水水质简介	(353)
5.2	地下水的自然成分	(354)
5.3	地下水污染和污染物	(368)
5.4	饮用水标准	(418)
5.5	污染物的输移	(435)
	参考文献	(471)
第6章	地下水处理	(489)
6.1	地下水处理简介	(489)
6.2	氧化	(491)
6.3	澄清作用	(493)
6.4	过滤作用	(494)
6.5	膜 滤	(499)
6.6	炭吸附	(502)
6.7	离子交换和无机吸附	(503)
6.8	生物处理	(504)
6.9	蒸 馏	(504)
6.10	消 毒	(504)
6.11	腐蚀控制	(508)

6.12	去除地下水中特定成分	(509)
6.13	饮用水处理成本	(528)
	参考文献	(533)
第7章	地下水资源开发	(540)
7.1	地下水资源开发情况简介	(540)
7.2	水 井	(544)
7.3	地下坝	(584)
7.4	泉水资源的开发和管理	(589)
	参考文献	(595)
第8章	地下水管理	(599)
8.1	地下水管理情况简介	(599)
8.2	地下水可持续性理念	(610)
8.3	法规框架	(622)
8.4	综合水资源管理	(639)
8.5	监 测	(645)
8.6	数据管理和地理信息系统	(660)
8.7	地下水资源的保护	(678)
8.8	模型与优化	(703)
8.9	人工含水层补给	(736)
	参考文献	(755)
第9章	地下水修复	(776)
9.1	地下水修复情况简介	(776)
9.2	风险评价	(784)
9.3	修复调查(RI)和可行性研究(FS)	(791)
9.4	污染源区修复	(802)
9.5	溶解相(羽状污染带)修复	(852)
9.6	测定修复技术的成功	(886)
	参考文献	(889)
附 表	(907)

第4章 气候变化

4.1 气候变化简介

美国加利福尼亚州水机构协会会长莱斯特·斯诺(Lester Snow)用以下几句话总结了气候、供水和人口增长之间的重要关系。

“科罗拉多河历来就是美国和墨西哥用水户丰富的供水源。随着供水需求的增长,历史上供水源丰富的时代已经结束。在干旱的前5年就已出现了水库低水位。内政部已开始着手制定有关缺水的标准。这些情况表明,要了解影响科罗拉多河供水的气候和水文条件,需要一个牢固的科学基础。我们知道,在将来不可避免地会发生干旱,由于气候变化和水文变化的影响,增加了干旱的不确定性,加之由于西南地区人口的快速增长和供水规模的不确定性,因而供水的竞争增大。”

“我支持那些想知道我们目前了解的与科罗拉多河流域的气候和水文相关的不确定性的人士出席这次会议,并将这些不确定性纳入水资源管理决策。在加利福尼亚州,人们越来越重视地区水资源管理综合规划,使我们通过利用资源管理战略的一个多元化的投资组合能够更好地响应水文数据的变化(Snow,2005)。”

自2005年以来,发生的几个事件进一步印证了这些话。最值得注意的是,“气候变化”和“全球变暖”这些短语如同联合国政府间气候变化委员会和美国前副总统戈尔先生双双获得2007年诺贝尔和平奖那样,已成为世界各地家庭谈论的话题,他们在研究和宣传气候变化影响的许多方面做了大量工作。几乎没有科学的图表,如果有的话,已为媒体广泛转载,并在全球讨论,如图4.1所示,展示了上述两方面的情况。该图说明了人类活动(如煤炭燃烧)引起大气中二氧化碳(CO_2)浓度的增加和全球气温的升高。似乎怀疑的人不多,2007年是南加利福尼亚

州有记录以来最干旱的年份,美国东南部也受到一次灾难性干旱的影

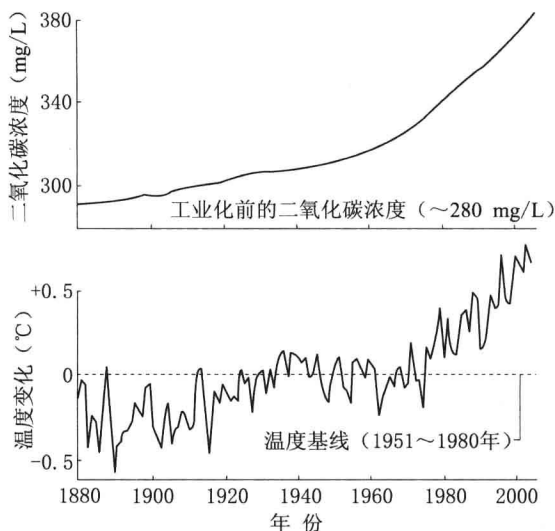


图 4.1 1880 年以来全球气候变化和二氧化碳浓度

(Riebek(2007)供稿)(NASA 图由 Robert simmon 根据美国国家海洋和大气管理局/美国环境系统研究公司 Tans 博士提供的二氧化碳数据和美国国家航空航天局哥达德太空研究所提供的温度数据绘制)

响。特大干旱往往激励着政治家、经济学家、水资源专家和广大市民们在寻求很多有关干旱问题发生原因的答案,尤其是影响供水的气候变化原因最重要。从这个意义上讲,2007 年可称为社会对水管理和气候变化进行反思的“完美年”。

4.2 自然气候循环

气候被定义为天气条件,它代表了一个地方,或者一个地区天气变化的一般模式,包括平均天气条件、自然因素的变异性 and 极端天气事件发生的信息(Lutgens 和 Tarbuck,1995)。天气和气候的性质可用基本要素表示,其中最主要的是:①气温;②空气湿度;③云状和云量;④降水类型和降水量;⑤气压;⑥风速和风向。这些要素均是变量,用天气

类型和气候类型来描述(Lutgens 和 Tarbuck, 1995)。天气和气候的主要区别是在这些基本要素变化的时间尺度上,天气是不断变化的,有时是每小时都在变化,而这些变化在已知时空条件下几乎会形成各种各样的天气条件。相比较而言,气候变化有些微妙,一般只考虑长时段的变化,甚至考虑数百年或更长时间。气候的一个更广泛的定义是:气候是气候系统内部相互作用的结果。它包括大气圈、水圈、岩石圈、生物圈、冰冻圈或积累在地球表面的冰和雪的长期行为。为了充分了解和预测气候系统大气成分的变化,必须了解太阳、海洋、冰盖、固体地球和所有生命的形态(Lutgens 和 Tarbuck, 1995)。

有关地球运动和长期气候变化的最重要的理论是在 20 世纪 30 年代由塞尔维亚数学家和天体物理学家、贝尔格莱德大学教授米卢廷·米兰科维奇(Milutin Milankovitch)提出的。这一理论后来被世界各地收集的地质和古气候证据所证实。由塞尔维亚皇家学院发表了他 1941 年在德国撰写的著作——《地球日照原理及其在冰河期理论中的应用》(Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem),然而,该著作在很大程度上被国际科学界所忽视。1969 年,该书被美国商务部和华盛顿特区国家科学基金会译成英文“Canon of Insolation of the Earth and its Application to the Problem of the Ice Ages”。1976 年,在《科学》杂志上发表了一项研究报告,分析了深海沉积物芯样,分析发现米兰科维奇理论实际上与气候变化的时期是相符的(Hays 等,1976)。具体来说,作者们将气温变化追溯到 450 000 年的记录进行分析,发现气候的主要变化与地球轨道的几何变化(离心率、黄赤交角和岁差)有密切关联;在地球轨道变化的不同阶段确实经历过冰河期。自此研究之后,美国国家科学院国家研究委员会已开始使用米兰科维奇周期模型(NRC, 1982)。他们认为:“地球轨道变化仍然是最充分地分析数万年时间尺度气候变化的机制,日照变化对地球低层大气的影 响是迄今为止研究得最清楚的。”

米兰科维奇对气候变化之谜和气候记录的研究很感兴趣,他注意到了随着时间的推移存在的差异。他推理全球气候变化是由地心倾斜和轨道规律性变化造成的,这些变化改变了行星与太阳的关系,引发了

冰期。米兰科维奇已确定地球在其轨道上是摇晃的,并通过仔细测量恒星的位置,应用其他行星和恒星的万有引力计算了地球轨道的缓慢变化。由米兰科维奇量化的如下3个变量称为米兰科维奇周期。

(1)地球轨道的偏心率周期。每90 000 ~ 100 000年地球绕太阳旋转的轨道发生变化,其近圆形轨道变得近似椭圆形,使地球离太阳更远。

(2)地球自转轴的倾角或倾斜周期。平均来说,每40 000年地球的赤道平面相对于其轨道平面的倾角有变化,不是移向北半球就是移向南半球,而远离太阳。

(3)地球的自转轴岁差或偏向。每22 000年其摆动有点变化(地球并不是完全像一个绕轴旋转的车轮,它像一个摆动轴顶一样旋转,即地轴是绕着北极星周围一个小偏角旋转的——译注)。

这3种周期意味着,在某些时期,只有较少的太阳能能抵达地球,致使只有少量的冰雪融化,寒冷使冰冻水大量增长。雪和冰持续更长的时间,并在不同季节开始积累。冰雪将一些阳光反射回太空,这也有助于冷却。气温下降,冰川开始向前推进(Teala Memorial Society of New York, 2007)。

气候受所有这3种周期循环的影响均以若干种方式组合在一起,有时彼此相互影响强烈程度加强,有时则相互作用。米兰科维奇周期对长期气候的一般影响及其目前的状态,将根据美国国家航空航天的资料在后面作进一步详细介绍(2007,见图4.2)。

地球轨道的偏心率随时间变化缓慢,变化范围几乎为0(圆)~0.07(偏心)。由于地球轨道变得更偏心(椭圆形),太阳到地球的距离在近日点(最接近)和远日点(离得最远)之间的差越来越大。目前,远日点与近日点的距离差只有3%(5×10^6 km),它出现在每年1月3日左右,而远日点则出现在每年7月4日左右。这种距离差相当于从每年7月到次年1月地球对接收的太阳辐射(日照)能量约增加6%。目前的趋势是偏心率减小。当地球轨道是椭圆时,在近日点比在远日点接收到的日照量多20%~30%,这就造成了与今天所经历的气候差异极大。

今天,地球旋转轴与围绕太阳的轨道面呈 23.5° 倾角,平均约

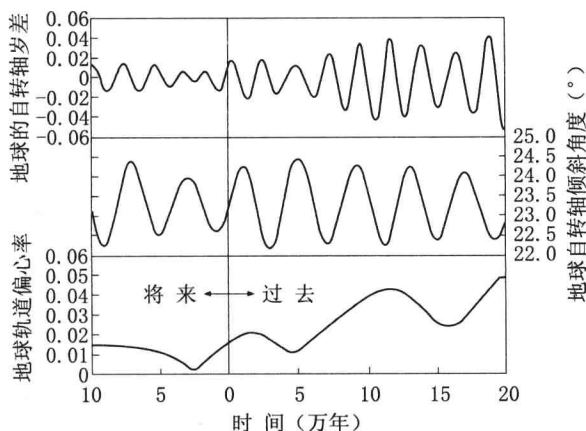


图 4.2 300 000 年米兰科维奇周期计算值

(由 NASA 提供,2007;资料来源于 Berger 和 Louté,1991)

40 000 年为一个周期,地球旋转轴的倾角为 $22.1^{\circ} \sim 24.5^{\circ}$ 。由于倾角的变化,季节的气温变化如同大家知道的那样也会增大。倾角越大,季节的气温变化也越大,夏季更热,冬季更冷;倾角越小,季节的气温变化也越小,夏季较凉,冬季就不那么寒冷。夏季凉爽就会使高纬度地区年复一年积雪和积冰,最终形成巨大的冰盖,覆盖着越来越多积雪的地球将更多的太阳能反射到太空中,造成气候格外的寒冷。目前的趋势是地球旋转轴的倾角在减小。

轴向岁差的变化改变了远日点和近日点的日期,因此在一个半球上,季节性差异增大;而在另一个半球上,季节性差异减小。如果一个半球指向近日点,则季节的差异更为极端。另一个半球的季节影响反过来较小。目前,北半球夏季发生在远日点附近,这意味着北半球季节之间的差异不是太大。气候岁差接近其峰值,这表明季节之间的差异有减小的趋势。

虽然米兰科维奇周期可以解释关于地质时间尺度(数万年以上)的长期气候变化,但是由于其持续时间长,使其成了解释或预测气候变化无效的工具。对于水资源评价与规划具有重要意义的是几十年到几个世纪时间尺度的气候变化。然而,大家可借鉴行之有效的科学的长

期气候变化和地质证据,这些证据出现在过去,也将不可避免地出现在未来。米兰科维奇未论述的第4个周期,可能将加速地球上自然气候变化-人类活动的加剧。图4.3所示为一个可以证明过去海平面比现在低的证据。其加剧的一个原因是,在冰河期累积在陆地上的冰很大程度上在融化,造成重大的全球海平面明显上升。因此,沿海地下含水层的地下水位随之上升,如同喀斯特地区墨西哥尤卡坦半岛的水下溶洞所证明的那样,图中所示的沉积景观只有在洞穴未被淹没时才能清楚可见。当海水位低于现在水位时,尤卡坦就会出现巨大的洞穴系统,其中许多洞穴与这个一样目前已完全充满淡水。

天气和气候要素的准确和系统的测量对于全面了解一个地区气候和预测可能影响供水的今后气候变化最为重要。不幸的是,气温和降水的记录、最重要的气候直接测量在欧洲只能追溯到几百年,低于世界其他地区。更糟糕的情况是,河道流量、泉水流量和地下水位的记录,这是淡水水量平衡

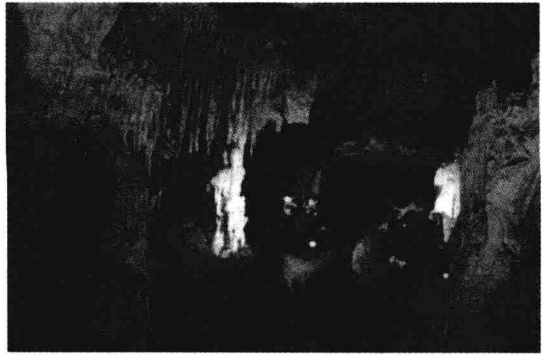


图4.3 洞穴潜水员潜入墨西哥尤卡坦半岛诺霍奇纳赫奇奇被淹没的有丰富沉积物(钟乳石、石笋、流石和地层柱)的洞穴

(2007,照片由全球水下探测者 David. Rhea 提供)

最重要的二项直接测量指标。尽管气候和水文直接测量指标的时间记录正在不断增加,但是越来越明显的是,收集的统计资料仅有100年左右的时间记录,仍然太短,这些统计资料是极端气候事件,是如洪水和干旱更准确的概率分析所必需的。例如,这是在一个雨季时的实测水文记录,1922年,科罗拉多河公约确定了美国上科罗拉多河和下科罗拉多河之间水资源的基本分配。该公约谈判时,认为该河年均流量约为259.03143亿 m^3 (21000000 acre-ft)(MAF,1 acre-ft = 136.8 m^3 ,该计算值有误,应为1233.48 m^3 ——译注)可供分配。该公约规定每个

流域年用水量为 92.511 225 亿 m^3 (7 500 000 acre-ft), 加上科罗拉多河开发获得的年用水量为 12.334 83 亿 m^3 (1 000 000 acre-ft)。随后, 与墨西哥签订的 1944 年条约, 每年向墨西哥提供 18.502 245 亿 m^3 (1 500 000 acre-ft) 水。在此期间, 据实测的现有水文资料, 在利费里处河流的年均流量约为 185.022 45 亿 m^3 (15 000 000 acre-ft) (ACWA 和 CRWUAC, 2005)。目前, 科罗拉多河水量的这种过度分配已造成该地区发生许多政治和社会问题。

据过去 20 年的研究, 曾经一度被认为是当地现象的一些气候波动是一个大尺度大气环流的组成部分, 周期性地影响全球天气和促成世界不同地区形成长期的气候特点。最有名并且研究得最多的是厄尔尼诺和南方振动 (ENSO)。几百年前, 厄瓜多尔和秘鲁海岸的当地居民将每年出现有规律的圣诞节后的天气事件 El Niño 称为“圣童” (因为它通常出现在圣诞节期间)。持续几周的厄尔尼诺天气事件之后, 一股弱且温暖的沿厄瓜多尔和秘鲁海岸向南的逆洋流取代了秘鲁的冷气流。然而, 每隔 3~7 年, 这股逆洋流就变得异常温暖和强大, 并伴生一个位于太平洋中部和东部洋面的大洋暖池, 从而影响全球的天气 (Lutgens 和 Tarbuck, 1995)。

记录上第二强的厄尔尼诺天气事件出现在 1982 年和 1983 年 (见图 4.4), 世界许多地区发生的各种类型的极端天气都与之有关。秘鲁和厄瓜多尔干旱地区一般都受到了暴雨和洪水的袭击。澳大利亚、印度尼西亚和菲律宾遭受了严重的旱灾, 而美国许多地区都经历了有史以来最温暖的冬天, 紧接着是一个潮湿的春天。1983 年春天, 内华达山脉、犹他州和内华达州山区暴雪导致犹他州和内华达州, 以及科罗拉多河沿岸发生泥石流和洪水泛滥。异常降雨给海湾国家和古巴带来洪水。不幸的是, 正如鲁特根斯 (Lutgens) 和塔布克 (Tarbuck) (1995) 所论述的那样, 厄尔尼诺的影响变化极大, 这部分影响大小取决于温度和太平洋的大洋暖池。在一次厄尔尼诺发生期间, 一个地区可能会遭受洪水淹没, 在下次厄尔尼诺事件发生期间, 该地区可能只受到干旱的袭击。水管理者恐惧和不断作准备应对的就是此类极端厄尔尼诺事件。美国国家气象局气候预测中心 (CPC)、美国国家海洋和大气局设有一

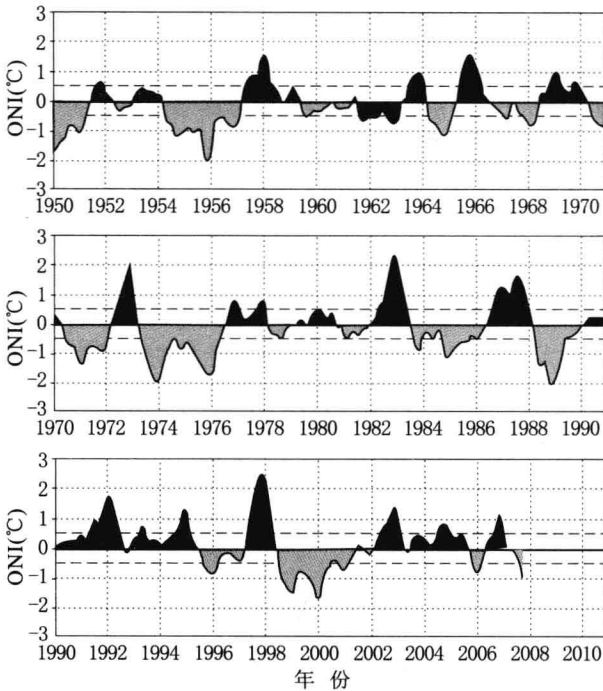


图 4.4 自 1950 年以来的海洋尼诺系数
(ONI) 的变化

(ONI 是监测、评价和预报厄尔尼诺和南方振荡 (ENSO) 的主要度量指标。正值大于 0.5, 一般说明是厄尔尼诺现象; 负值低于 -0.5, 一般说明是拉尼娜现象(由 CPC/NCEP 提供资料, 2007b))

个微博网页, 专用于厄尔尼诺现象和拉尼娜事件的研究和预报 (CPC, 2007a)。

对于地表水供水系统来说, 洪水和干旱概率是关键的设计要素。虽然地下水供水系统受极端气候事件的影响要小许多, 但由于长期干旱对水需求的增加, 这些供水系统也会承受极大的压力。爱德华兹 (Edwards) 和雷德蒙 (Redmonds) 对美国科罗拉多河流域的讨论表明, 了解和预测供水管理的周期性气候模式是重要的 (Edwards 和 Redmond, 2005)。

科罗拉多河河水主要来源于犹他州、怀俄明州和科罗拉多州的高山区流域,流经7个州和2个国家。加利福尼亚湾距科罗拉多河和格林河源分别约为2 414 km(1 500 mi)、2 736 km(1 700 mi)。2条河约80%的流量流入鲍威尔湖,其余水量主要来自圣胡安河和山脉。科罗拉多河美国境内河段流域面积为626 780 km²(242 000 mi²),该河段高山面积仅占约1/7,但提供了总流量的约6/7的水量。许多下游河段由于自然条件而水量减少。冬季降水大部分来自山脉累积的降雪。春季降水量大,但夏季降水通常微乎其微,虽然影响水的需求,还需改变水的供应方式。因此,气候是对山区影响近一年或十年河水供应的关键因素。

厄尔尼诺和南方振动的暖位相,通常给美国西南部带来潮湿、寒冷的冬季,而给太平洋西北及北部落基山脉带来温暖、干燥的冬季。总的来说,美国西南部厄尔尼诺的冬天往往有更多的阴雨天,每个阴雨天可下更多的雨水,雨天更持久。所有这些因素都有利于增加径流量。值得注意的是,非常大或非常小的流量与厄尔尼诺现象和总径流量有密切的关系。厄尔尼诺和南方振动的冷位相,即拉尼娜现象,它与过去75年美国西南部干燥、温暖的冬季有密切关系,与西北部湿润、寒冷的冬季关系不大。了解厄尔尼诺和南方振动及其对科罗拉多河流域的影响,对于预测冬季积雪至关重要。到目前为止,北美洲西部气候与EN-SO现象的关系似乎局限于冬季,与夏季气候关系甚微或不明确。关系极大的是圣胡安山脉南部的较低盆地,关系变得不太清楚的是再往北对怀俄明州上格林河和温德河山脉的影响明显。

在分析科罗拉多河流域气候的基础上,爱德华兹和雷德蒙(2005)作了以下小结:

“通过多次重复利用,科罗拉多河河流可为2 800万人提供供水,在未来几十年,由于美国西南地区人口继续以最快的速度增加,供水需求也将继续大量增长。该流域通过大量的基础设施系统开发,旨在减缓该地区显著的气候变化。然而,值得注意的是,该系统还没有充分经受过严重气候事件的考验,虽曾经从发生的古气候事件中吸取了教训。尽管该系统并不完善,但仍为最近的干旱提供了一点可实际操作的经

验。”

如图 4.5 和图 4.6 所示为最近几次干旱和水利用对美国西部最重要的水资源米德湖的综合影响。该湖形成于 20 世纪 30 年代,通过胡佛大坝拦蓄了科罗拉多河河水,确保了亚利桑那州、内华达州、加利福尼亚州和墨西哥北部的稳定供水,该水库是世界上最大的水库之一。当米德湖蓄满水时,其容纳的水量大致相当于流经科罗拉多河 2



图 4.5 2004 年的米德湖

年多时间的水量,蓄水量约为 35.2×10^{12} L (合 9.3×10^{12} gal) (美国自然资源保护局安迪·珀尼克供稿)。内华达州南部 90% 的水来自米德湖,其放水由内华达州南部水资源管理局管理。当湖水位下降,并预期会低于高程 349 m (1 145 ft) 时,水资源管理局宣布进入干旱警戒状态;一旦水位低于 349 m,干旱警戒状态立刻升级为干旱紧急状态。如果湖泊水位小于 343 m (1 125 ft),应立即实施干旱应急计划。每个水位警戒状态都要启动该地区各种控制措施,并加以实施。从限制花园浇水、洗车,城市公园循环喷水和公共场所用水,到采取提高水费办法激励节约用水 (Allen, 2003)。

在 2007 年 4 月,水位自 1965 年以来第一次下降到 343 m,直至 2007 年 9 月仍维持并低于这一基准。由图 4.6 可知,大约花了 20 年的时间,米德湖湖水位才从 1965 年的低水位得以恢复。正如本章所讨论的,科罗拉多河河水的过度分配,再加上由于人口增长和干旱的影响,给这个天然地下水补给非常少的半干旱到干旱地区的地下水资源增加了额外的压力。

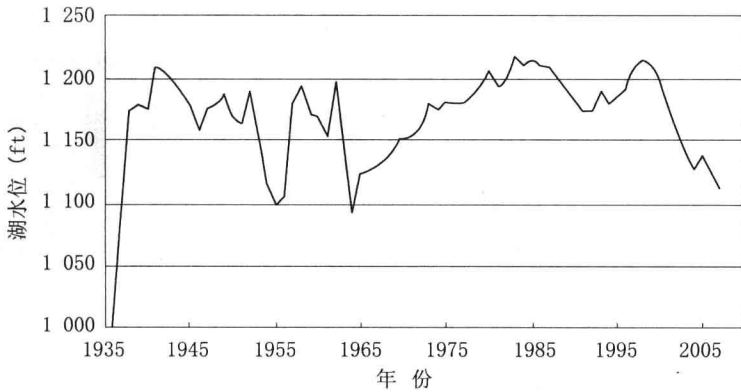


图 4.6 1935 ~ 2007 年 9 月米德湖水位
(资料来源 USBR)

4.2.1 干旱

正如美国国家干旱减灾中心(NDMC, 2007)所总结的那样,干旱具有一种正常的、经常性的气候特征,虽然许多人错误地认为它是一种罕见的偶然事件。如图 4.7 所示,使人们想起经常发生这样简单的事实。但是,目前的每次干旱可能是有史以来最使人类受影响的事件,因为人们往往会忘却过去那些不愉快的经历,这是可以理解的(由于与一般公众不同,水资源管理人员不期望有这一特征)。当旱灾是历史性的时候,它们可能引发重大的社会变化,并永远影响水资源的利用和管理。例如,根据时间和空间范围,在美国干旱主要为发生于 20 世纪(被认为是)30 年代的沙尘暴,在大平原某些地区历时长达 7 年(见图 4.8)。在约翰·斯坦贝克的小说《愤怒的葡萄》中记述的这次干旱的严重性:“范围之广和时间的漫长,使它导致了数百万人口从大平原迁移到美国西部寻找工作和更好的生活条件。它还极大地改变了农业的方式,包括前所未有的大规模使用地下水灌溉整个大平原和整个美国西部。”