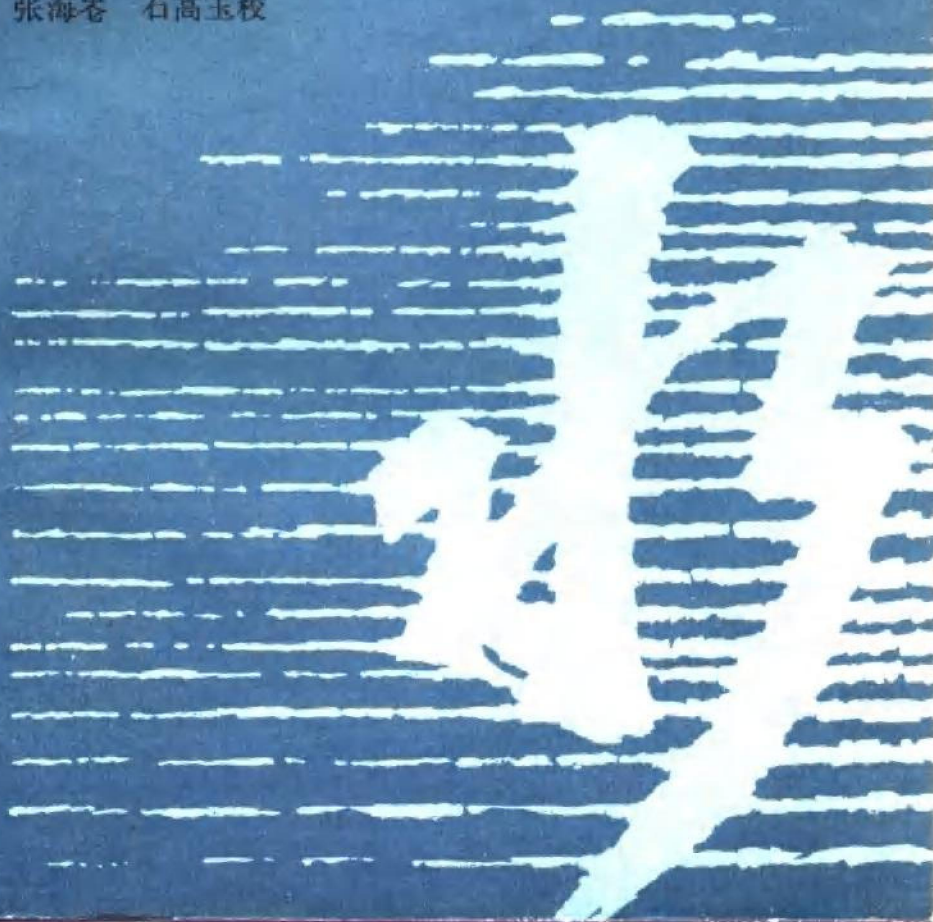


随机水 资源技术

〔英〕科特戈达著

金光炎译

张海岩 石高玉校



随 机 水 资 源 技 术

〔英〕科特戈达 著
金光炎 译
张海仑 石高玉 校

农 业 出 版 社

封面设计 李 飙

Stochastic Water Resources Technology
N. T. Kottegoda, The MacMillan Press LTD,

随机水资源技术

〔英〕科特戈达 著

金光炎 译

张海仑 石高玉 校

* * *

责任编辑 张淑媛

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 13.75印张 352 千字

1987 年11月第1版 1987 年11月北京第1次印刷

印数 1—1,900册 定价 3.95 元

ISBN 7-109-00264-0/S·192

统一书号 13144·319

序 言

编写本书的目的，是想对理解水文学和水资源工程中的数学和统计方法作出介绍。过去几十年，在时间系列、随机过程、概率方法、系统工程和决策分析方面，已有了很大的发展。在纯科学和应用科学的不少书籍和愈来愈多的杂志中，已发展和提出了一些新技术。但是，有关本专题各种事物的复杂性，已促使作者们去选择这样一种文章，即不受大多数可能读者的同化。

目前，有必要改进技术，以来处理渗透于水资源规划设计中的不可靠性和随机性影响。至今，限制性假定和模型选择问题已妨碍了应用古典统计法的发展。贝叶斯方法亦有缺点，其中有些问题在本书中加以讨论。对有关大气过程、海洋温度和其他影响气候的因素的机制常常认识和了解不足；对水文循环中的陆相方面的认识也是如此。实际工作者不可能等到数学、气候学和物理学家们解决了与工程有关的问题后才去干。为了规划上的必需以及制订满足人口增长需要的实施方案，要求利用现有的理论和数学方法，对其中的假定和限制作出鉴别。本书打算填补学院派和技术工作者之间所存在的鸿沟，并介绍某些有用的技术，以有助于水资源系统的设计。

可以设想，这样做会对高等院校的学生和从事实际工作的工程师很有价值。预备知识只需了解基本的统计理论和方法，以及初等微积分和矩阵代数的基本知识。特别是，研究工作者必能从本书的综述中得到裨益。作者希望，通过所包含的大范围课题、许多引证以及广泛的参考文献，会使此书成为有用的参考书。这本书也应当引起对实际应用有兴趣的统计工作者的注意。

在此应对许多鼓励编写此书的人们表示感谢，他们的建设性批评和意见使作者在编写此书中受益非浅。另外，还要感谢提供资料的人们和启发作者的一些著者。

科特戈达 (N. T. Kottegoda)

伯明翰，1980年

目 录

序言

第一章 绪论和气候	1
§ 1.1 水文的不确定性	2
§ 1.2 气候及其变化	8
§ 1.3 本书范围	16
第二章 水文时间系列分析	22
§ 2.1 时间系列和随机过程的一般定义	22
§ 2.2 时间系列的分量和主要性质	24
§ 2.3 趋势	29
§ 2.4 周期	38
§ 2.5 自相关	45
§ 2.6 谱方法	51
§ 2.7 谱和自相关图的进一步评论	63
§ 2.8 互相关图	64
§ 2.9 互谱分析	66
§ 2.10 结语	69
第三章 概率函数及其应用	76
§ 3.1 水文资料的概率分布	76
§ 3.2 皮尔逊密度函数	80
§ 3.3 用矩法估计	85
§ 3.4 极大似然法	91
§ 3.5 拟合优度检验	98
§ 3.6 其他概率函数族	108
§ 3.7 随机数	111
§ 3.8 其他评论和进一步阅读材料	121

第四章 线性随机模型	131
§ 4.1 资料生成和假定	131
§ 4.2 线性自回归模型	133
§ 4.3 偏自相关	144
§ 4.4 移动平均模型	145
§ 4.5 博克斯—詹金斯模型: 公式和鉴别	147
§ 4.6 应用于非正态系列	158
§ 4.7 季节模型	161
§ 4.8 多站资料生成	169
§ 4.9 短期预报	178
§ 4.10 实际应用和一般评述	187
第五章 特殊性质和模型	200
§ 5.1 轮次及交互性质	200
§ 5.2 李普尔图和水库库容	209
§ 5.3 极差分析	214
§ 5.4 分数高斯噪声	223
§ 5.5 折线模型	233
§ 5.6 结语	235
第六章 洪水统计处理	243
§ 6.1 年最大值系列和重现期	244
§ 6.2 极值分布	245
§ 6.3 耿贝尔分布	245
§ 6.4 一般的极值分布	261
§ 6.5 对数正态分布	266
§ 6.6 用于极值的皮尔逊Ⅲ型	275
§ 6.7 洪水估计中频率方法的讨论	281
§ 6.8 二项、普阿松和多项分布	284
§ 6.9 超定量法	288
§ 6.10 区域洪水频率分析	292
§ 6.11 最大可能降水	295
§ 6.12 其他方法和评论	298
§ 6.13 结语和摘要	299

第七章 概率论应用于水库蓄水	310
§ 7.1 排队论和蓄水	310
§ 7.2 马尔柯夫链的定义	311
§ 7.3 莫兰的水库理论	312
§ 7.4 一年内失事的古尔德方法	324
§ 7.5 入流的自相关和季节变化	328
§ 7.6 有关课题、其他工作和评述	333
第八章 系统工程中的随机规划方法	342
§ 8.1 历史背景	342
§ 8.2 系统工程导论	343
§ 8.3 线性规划	348
§ 8.4 动态规划	363
§ 8.5 系统工程的其他方法	386
§ 8.6 一般评述	388
第九章 应用决策论	399
§ 9.1 历史背景	400
§ 9.2 贝叶斯决策	409
§ 9.3 贝叶斯理论的进一步应用和一般评述	420
§ 9.4 决策论的其他方法和阅读材料	424

第一章 绪论和气候

水是人类基本的和宝贵的资源之一，是各种生命赖以生存的必需品。但是，同石油、煤炭和别的天然资源不一样，水是可以重复使用的。它除了提供人身所需之外，还对农业、工业、航海和产生能量起到必不可少的作用。因此，为了在各种技术、经济、环境等许可的条件下发挥它最大的效益，水的管理和保护是极其重要的。

二十世纪，在整个世界上，对水的需求有明显上升的趋势。人类这种不可抑制性需水量的急剧增长，部分原因是由于文明的显著发展。

单就民用消耗来说，西方国家每人每天水的需要量为几百升。例如，纽约城每人每天超过 1000 升。另一方面，在比较贫困的国家中，通常缺少舒适的条件，用水水平较低，每人每天约需 10 升，甚至更少；在非洲，可能只需维持生命的水量。然而，在当前发展计划不断进行和生活水平逐步提高的情况下，用水消耗量将不可避免地要上升。

所利用的水量中 75% 以上是为了满足农业的需要。如果不进行灌溉，世界上粮食总产量会减少三分之一左右。实际上，当人们掌握利用河水的技术后，过去许多大的文明地区都出现在地球上一些最大的河流流域上。尼罗河的生活给水水域、美索不达米亚（Mesopotamia）诸河、印度河和中国黄河的历史灌溉系统，都是值得注意的例子。大约在二千年以前，古代のスリ兰卡以灌溉实施得到了温饱。在气候变得干旱时，某些文明地区退步了。这种气候上的重要课题，分别在以下各节中来讨论。

现时，世界人口在几十年中有了成倍的增加，而早几个世纪增长速度很慢。按照 1976 年的统计数字，估计有 40 亿居民；尽管当前某些人口稠密国的人口增长率降低，到本世纪末，预计可达 70 亿左右。因此，不可避免地要增加更多的供水系统，以满足农业、民用和工业的需水量。例如，印度到 2000 年需要增加一倍的灌溉设施，以避免由人口（现在估计超过 6 亿）引起的大量饥荒。

不幸的是，可利用水量中只有极少部分能在它的存在条件范围（或地区）内供给人类。这主要由于地球上总水量（估计为 3.26 亿立方英里或 13.59 立方公里）的约 97.2% 在海洋中，而南北极的冰覆盖和冰河又占去了 2.15%。剩余部分为包括土壤含水量在内的地下水、河湖中的地表水和大气中的水汽，地下水大大地超过其他各部分水量^[21, 22]。

因此，造成干旱与困苦的并非是地球上缺水，主要的问题是水常常不能在需要它的时间和地点找到；即使找到，水质也可能是不好的。况且，要求是变的；需求形式、供水率和供水标准从发达国家到发展中国家是不同的，地理位置不一样，它们也不同。所有这些都显示出谨慎进行水资源系统的规划是重要的，以便得到最大的效益。

§ 1.1 水文的不确定性

本书是介绍水文学和水资源系统中的数学和统计处理方法，全部讨论地表水方面。这里把河川径流处理作为随机过程；随机一词，见第二章中的解释。理由是河川径流为降水和其他过程的函数，就目前的知识水平，看来它在时间和空间上是随机演变的。即使基本现象和它们的相互作用全然了解，也不可能用数学方法描述天然水运动过程中的流量而不涉及非系统的或未知的影响。对水文过程的简略考察将会证实这个观点，并能说明这种纯

因果型关系的局限性。

首先，特定时间和地点上的河川径流主要受前期降雨的影响。该两变数之间的函数关系，不仅依赖于有效降雨的时空分布，而且也取决于河流流域的自然地理特征。此外，还有许多别的因子。流域滞蓄，随昼夜和季节而变的蒸发损失，植物散发，同土壤有关的入渗，植物以及前期降雨都是降雨方程中的重要结构。河川径流在不同程度上还受偶尔波动的地下水补给，湖泊溢流和融雪水也补充给它。此外，天然的侵蚀和淤填要影响水运动过程的传递性质。再者，必须考虑土地利用和植物的变化、水资源的开发以及其他形式的干扰。所有这些组合因子使河川径流在水文循环中具有高度复杂的过程。

进行所涉及变数的测量和估计，将会导致随机误差。产生误差的一个一般例子是工程师的率定曲线。从全部确定性上的意义来说，该曲线的意图是建立河流中的水位流量关系。不过，随机影响（如河渠形状变化、泥沙运动和杂草生长）会导致不精确性，这可能是很大的，特别是在大洪水之后。进一步说，如把T小时的单位线取作河流站上统一的直接径流时间过程图，其单位线有效降雨为单位输入，且在时间上和测站以上全部流域面积范围内都是均匀分布的。可是，在应用中发现，由于前期降雨、气温、地面糙率和积雪等的千变万化，单位线本身也有随机变化，每次暴雨在实际重要时间尺度上的相应值不一样。同样，对地下水含水层结构作描述时，如果不考虑所涉及的随机过程，也是不会完整的。在此，为了分析的目的，假定径流和蓄水特征在空间和时间上为固定的，但经验证明，关于地下水径流的一般假定常常不真实。

实际上，现实世界不必确切描述。解决问题的最好办法是通过数学模型的抽象概念。此外，所有上述的事实都证明了采用时间系列法和概率表示法是合理的，这将在以下各章中介绍。同时，只要实际上可行，过程必须进行鉴别和模拟。这就要对系统

的输入和输出作细致的检查。对于一定的问题，某些因子给出基本结构和可能的（或确定性的）元素，而别的因子给出波动的（或随机性的）元素。

制作数学模型，如果不考虑经验方面的论据，显然是无用的。这一点，不仅在有关的量测数据上是如此，而对许多技术、社会、法律和经济方面的因子和限制也一样。此种多目标的方法学是一般的系统方法〔克利尔(Klir)^[15]和艾塞曼(Iserman)^[12]给出了系统中各现象鉴别的理论基础，叶夫耶维奇(Yevjevich)^[40]强调了水文过程的不确定性方面〕。这应当在现代水资源技术发展上起主要作用。

如果不考虑气候的重要作用，上述讨论是不完全的。气候过去有变化和将来也会继续变化的事实，当然是无可争辩的；实际上，它要在几十年、几个世纪或更长时期内才出现重大差别。这个问题仍然有着极大的争论，主要是关于各种时间尺度内气候变化的原因和显著性。目前，有些气候学者正在推测未来时期（如50或100年）内气候的情况；在供水系统的计划和管理中，这种时期被认为是经济发展可以预见的界限。

关于气候对未来河川径流、洪水出现和干旱（包括与它有关的缺水）的冲击影响，具有很大的不确定性。气候模式有某种重复性。例如，在最近十年内，中部非洲的萨赫勒(Sahel)地区（在撒哈拉沙漠的南部周边）已造成了广布的饥饿与死亡。然而，如图1.1所示，过去有相似的持续时间。应当记住，干旱是个主观概念，没有一般的定义，但现在它能比历史时期造成更大的困苦。

美国东部、西欧和苏联的最近干旱期以及印度雨季的延续，已造成了严重的经济后果。尽管如此，许多人有折衷意见，即气候变化不必使将来的计划作彻底改变〔马塔拉斯(Matalas)和费厄林(Fiering)^[25]讨论了规划设计中需要有硬性和弹性的内容；布赖森(Bryson)和默里(Murray)^[2]指的是粮食生产和气

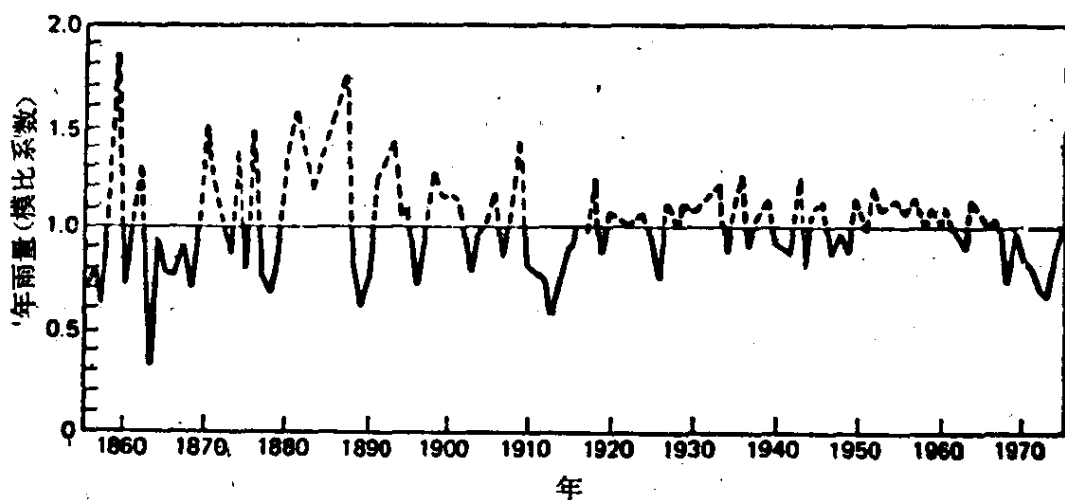


图 1.1 萨赫勒地区的平均年雨量（虚线示平均径流）

候的关系〕。1931 至 1960 年（组成许多历史水文气象记录中的一部分）被认为是过去十世纪中不正常的 30 年〔24〕。实际上，二十世纪的前半期，通常称为气候最优期，其中湿润年的不平常延续示例于图 1.2 中。撒哈拉等沙漠 1960 年以来的发展趋势也许是缓慢变冷重新开始的信号。世界其他部分的气候波动也有记录〔莫里斯 (Morris) 和拉特克利夫 (Ratcliff) 〔27〕推测，欧洲本世纪七十年代中期的干旱，重现期为 250 年〕。图 1.3 给出伏尔加河平均流量变化的例子，据认为这是北太平洋出现的各种大气系统的结果。然而，有图 1.4 那样的情况，季雨量的波动有相反的影响，以致年平均值相对不变。关于气候变化的明显性，设想在世界上检验不交叉 10 年期平均值之间的差额，以来定出它的变化〔4〕。适合于此目标的一些统计检验见有关文献〔在此可用韦尔什 (Welch) 或费希尔—贝伦斯 (Fisher-Behrens) 检验，见〔13〕〕。

这些例子强调了气候同水资源计划和管理有密切关系。因此，对此课题进行进一步研究是有益的。

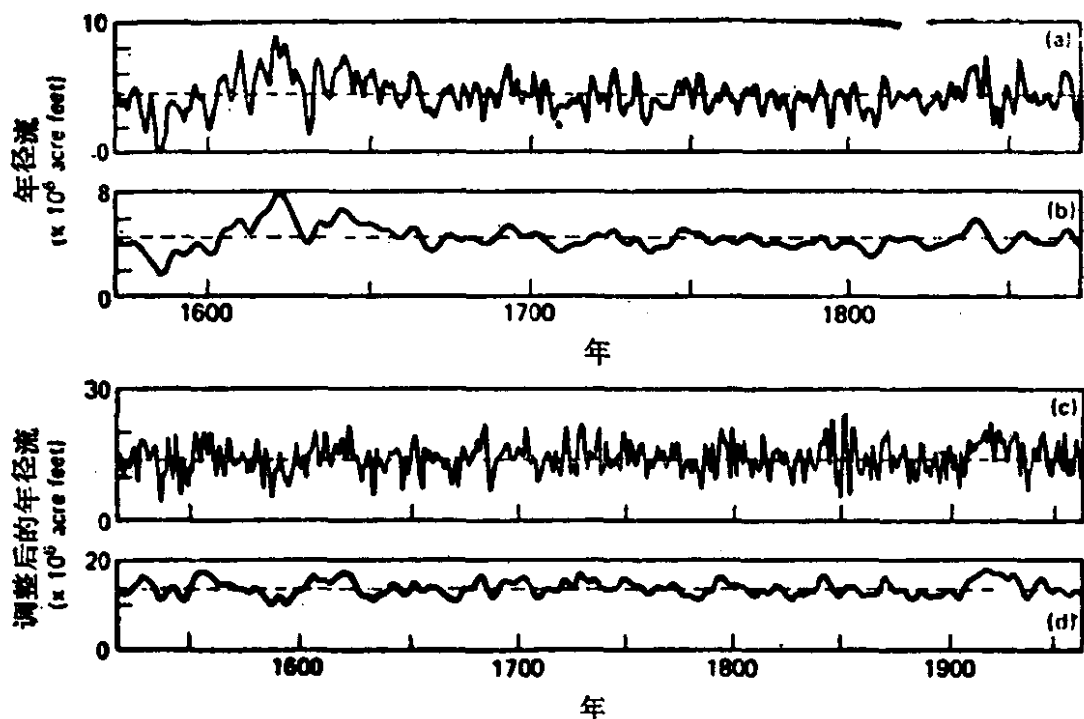


图 1.2 由树轮资料 (取自[32]) 推算的年径流过程图[33];
 (a)美国犹他州格林(Green)河格林站, 未经滤波; (b)同上站, 已经滤波; (c)美国亚利桑那州科罗拉多河利费雷(Lee Ferry)站, 未经滤波; (d)同上站, 已经滤波

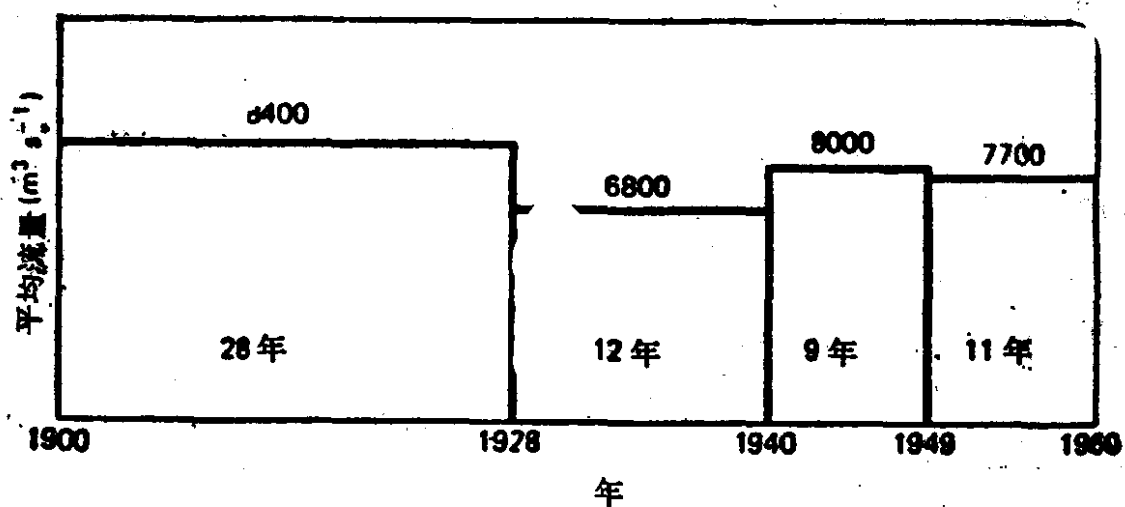


图 1.3 苏联伏尔加河伏尔加城站平均径流的变化

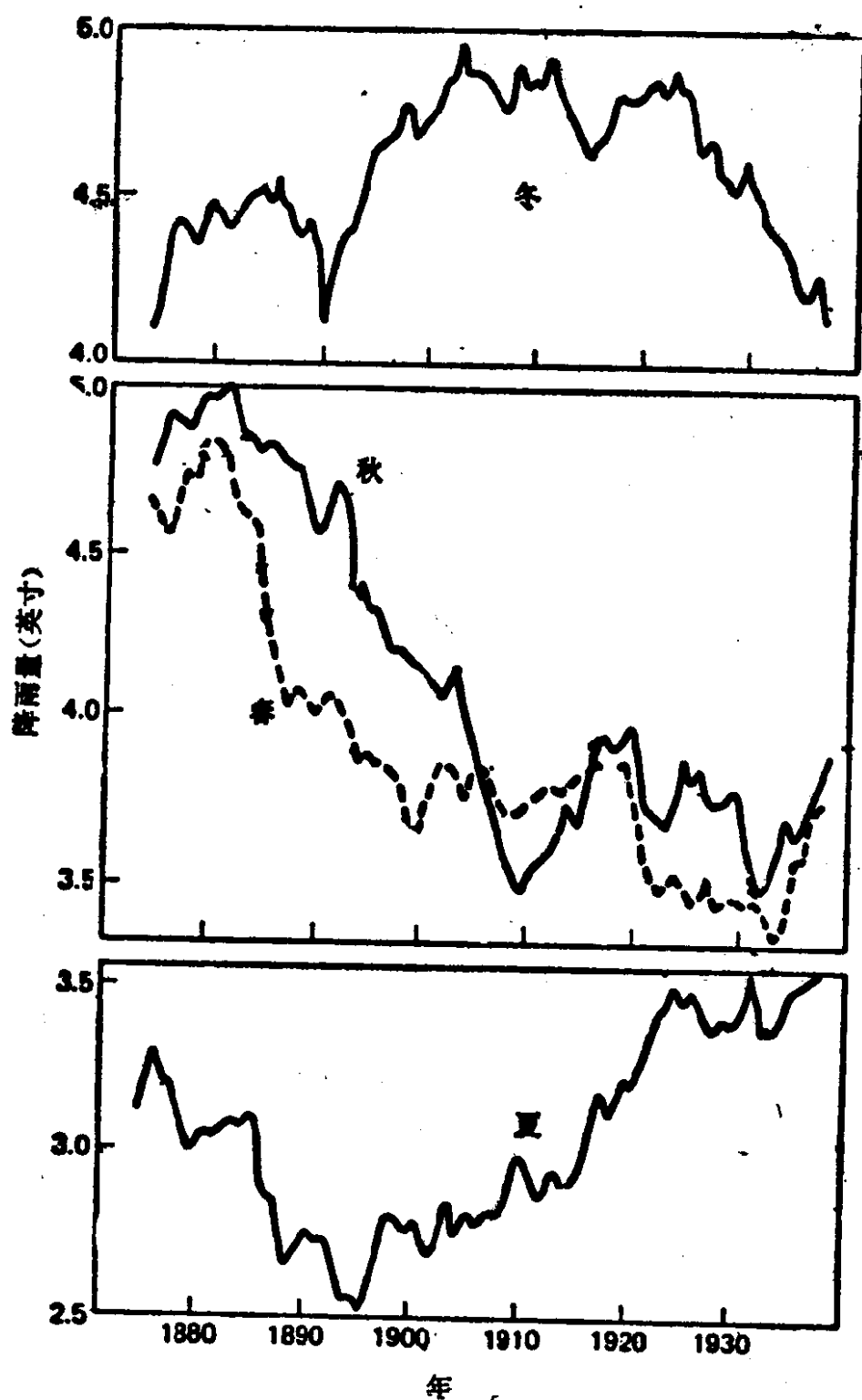


图 1.4 澳大利亚新南威尔士州代尼利基(Deniliqui)站季雨量的30年移动平均值(取自[16])

§ 1.2 气候及其变化

按照希腊神话，天气的剧烈变化出于上帝的行动。后来，由于种种原因，甚至是对“异教徒”的指控，阻碍了天文学的发展。例如，据说意大利人布鲁诺 (Bruno) 约在 400 年前被活活烧死，只是由于他假设地球围绕太阳运行，同当时的信仰正好相反。

现代的预报技术和科学论据已有幸地克服了古代文化的习俗，并胜过了航海家和农民们传统的根据征兆预测大气的方法。气象学早就指出，天气主要由于太阳辐射和地球自转而形成。地球从热带区（其中有大片森林和沙漠）到南北极以及陆地和海洋表面之间的受热是不相等的，这就导致全球系统的高压和低压区的形成。因此，产生了大气循环系统。这些都受地球自转和山区存在的极大影响。

尽管如此复杂，完善的仪器结合高深知识的卫星已可作短期预报，预报期为几天（不是几星期或几个月），差不多能达到可靠的程度。这种成功是由于这些预报一般是处理已有的系统。如果可利用世界范围内的资料（特别是南半球海洋表面的资料），再加入所有的物理因子，甚至能得到更好的结果。短期天气预报，极大程度上是以纳维尔—斯托克斯 (Navier-Stokes) 的数值积分和热动力方程（包括能量传递以及假设的热源和热库）为基础的。另一方面，长期预报基于未来的系统，故失败率是高的。这种预报常会变成一种统计运算，即使是投机家的直观预报，也能与气象学家所推导的一样有效。人类关于天气系统如何运行的知识是不完全的，为此，长期预报常常发生很大的误差。

1.2.1 气候波动

在特定位置或区域上各气象条件的总和或时间平均叫做气候。按此定义，气候不象天气那样不能预报；虽然如此，它以高

度复杂的方式在全球范围内和局部地区上进行脉动。大概在过去百万年内，已知气候具有许多型式的波动，冰期是最长的征兆。在这些深冻（大约平均每十万年一次）时期内，北半球极地上冰的覆盖一直推进到接近于纽约和伦敦的纬度为止。冰覆盖的这种增加，导致较高的反射率，这就意味着从地球上反射了较多的热量。同时，大气压力系统受到曲折的极地环流风（叫做极地射流）变化的影响。这是自西向东的流动，在地区上被认为是向西来的风，它们在强度和方向上连续地变化。射流位置的移动及其回路数目的改变，影响到撒哈拉到中东、印度和美国的降水量，造成大陆上同时内的各种变化（附带提及，注意到在本世纪七十年代也还出现过此种影响，这在学科上是有意义的，重大的剧变并非必要条件）。在这期间，约一千年左右，世界经历着“小冰期”（例如它盛行于几世纪以前），这就导致全球气候的次要剧变。

此外，还有较短历时的波动。例如，据认为完全改变方向出现二百年的期间内^[17, 18]。再则，追溯到上一世纪，奥地利地理学者布鲁克纳（E. Bruckner）在获得 1885 年以前全部观测数据（如冰河资料、温度和降雨记录、湖泊和河流水位）之后，推测有一个 35 年的周期。然而，自那以后，这种情况大大地消失了。在许多此类准周期中有大量出现的太阳黑子周期性变动（这一点以后还要谈到）以及两年一次的大气脉动〔两年脉动的证据见^[20]，另一例是甘尼赛斯（Genesis）书中约瑟夫（Joseph）的“七年丰收和七年饥荒现象”，按照推测，暗示尼罗河有十四年的波动〕。它们之中最主要的是在方差谱中表现为纯粹的峰值（见第二章）。考察气候变化的原因以及它们的重要性是很有用处的。

1.2.2 气候变化的主要原因

气候学中一个特别要考虑的领域是过去长期的周期性变化，这归因于太阳、月亮和其他行星的重力作用。在苏联的研究文献中已探索了宇宙的地球物理影响的某些方面，此类研究在本世纪