

〔美〕 何塞·R·科尔多瓦 著
拉斐尔·L·布拉斯

灌溉系统的随机控制

谢安周 赵宝璋等译 金光炎校

农业出版社

灌溉系统的随机控制

〔美〕 何塞·R. 科尔多瓦 著
拉斐尔·L. 布拉斯

谢安周 赵宝璋 等译

金光炎 校

农 业 出 版 社

STOCHASTIC CONTROL OF
IRRIGATION SYSTEMS
JOSE R. CORDOVA
RAFAEL L. BRAS
RALPH M. PARSONS LABORATORY
FOR
WATER RESOURCES AND HYDRODYNAMICS
Report NO. 239
March 1979

灌溉系统的随机控制

〔美〕 何塞·R. 科尔多瓦 著
拉斐尔·L. 布拉斯

谢安周 赵宝璋 等译

金光炎 校

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 8.25 印张 207 千字
1985 年 5 月第 1 版 1985 年 5 月北京第 1 次印刷
印数 1—2,210 册

统一书号 16144·2938 定价 2.10 元

译 者

第一章	谢安周	第五章	赵宝璋
第二章	谢安周	第六章	汪昭斌
第三章	田 园	第七章	谢安周
第四章	朱厚生	附录摘要	谢安周

译 者 的 话

这本书是设于美国麻省理工学院土木系的、以拉尔夫·M. 帕森斯命名的水资源和流体动力学研究所的研究人员何塞·R. 科尔多瓦和拉斐尔·L. 布拉斯于1979年3月提出的研究报告。

这项研究的目的是试图利用随机控制原理和方法在作物生长季节内最优分配灌溉水以取得最大经济效益。

作者与多数专家一样,认为最能反映环境对作物产量影响的代表变量是蒸散发比(实际蒸散发量与可能蒸散发量之比),并以此为起点进行研究。本书首先对以作物产量作为蒸散比的函数的几个典型作物数学模型的有效性进行了探讨。作经济分析时,这些模型是必要的。

在土壤水平衡中,作者对随机量降雨(雨深、雨强、历时和次数)、降雨入渗量和耕地的实际蒸散发量等的概率特性进行了分析,同时提出了计算公式。作者把土壤水消退过程看成是蒸散发和深层渗漏的生成结构,并为土壤水含量的函数。

为了确定灌溉水的最优分配,分析了每个决策阶段末的土壤含水量和在该决策阶段内实际总蒸散发量的概率特性。

作者把作物全生长期分为若干个等长的决策阶段,每个决策阶段又按等长时段 Δt (一或二日)分为 m 个阶段(时段),以土壤含水量为状态变量,把阶段间土壤含水量状态的转移概率,假定为离散状态、离散时间的齐次马尔柯夫过程,利用马尔柯夫公式,推求决策阶段末土壤含水量的概率累积函数和决策阶段内的实际蒸散发量的均值和标准差。

以上所讨论的是未加控制的自然状态。在有控制,即有灌溉

供水的情况下，作者用随机动态规划算法求解了灌溉水的分配问题，提出了有控制条件下的计算公式。在给定控制规程，即给定灌溉策略条件下，推求了净效益的均值和方差。

作者对一个实例进行了分析研究。用模拟模型的结果验证了随机动态规划算法所得结果的有效性。从而得出结论：随机控制策略优于确定性策略。

灌溉系统随机控制是一项新技术，对于合理和充分地利用灌溉水资源有重要意义。但在国内还缺乏对这项技术的研究和实践。本书所介绍的方法虽不够完善，但有一定的参考价值。

原书前的摘要和谢启，在译本中删掉了。

附录是实例研究的结果，它对这项研究报告可起到补充和说明的作用，可帮助读者对本书内容的理解，故在此译本中予以保留，但内容有删节。

本书由五人合译，谢安周和赵宝璋对全部译文进行了校对和润色，请金光炎同志进行了审查和修改。

由于译者水平所限，可能有误译之处，敬希读者指正。

译 者

一九八四年二月于北京

目 录

第一章 导论.....	1
1.1 灌溉水分配问题综述.....	1
1.2 实例研究.....	2
1.3 各章要点.....	3
第二章 作物模型	5
2.1 引言.....	5
2.2 生长指标.....	7
2.3 对现有作物模型的评论.....	12
2.4 小结.....	16
第三章 土壤水平衡.....	20
3.1 引言.....	20
3.2 入渗和地面径流.....	21
3.3 再分配过程.....	26
3.4 土壤水对植物的可利用性.....	26
3.4.1 精确的一维方法.....	27
3.4.2 概念性模型	29
3.5 土壤水平衡.....	34
3.5.1 给定暴雨的入渗量	35
3.5.2 土壤水消退过程	36
3.6 实例研究中土壤水平衡成分的说明.....	38
3.6.1 实际蒸散发过程.....	39
3.6.2 土壤参数	40
3.6.3 土壤水消退过程.....	41
3.7 小结.....	44
第四章 暴雨入渗的随机描述	45
4.1 引言.....	45

4.2	一个时段内的暴雨次数	46
4.3	暴雨特征	47
4.3.1	暴雨深度	47
4.3.2	暴雨强度和历时	47
4.4	给定暴雨的累积入渗量	48
4.4.1	考虑径流时累积入渗量的均值	50
4.4.2	考虑径流时累积入渗量的方差	52
4.5	实例研究的降雨分析	55
4.5.1	概述	55
4.5.2	暴雨特征	56
4.5.3	模拟模型	68
4.5.4	入渗量模拟概率分布与理论概率分布的比较	69
4.6	小结	80
第五章	阶段末土壤含水量与实际蒸散发量的概率分布	81
5.1	引言	81
5.2	阶段末土壤含水量	85
5.2.1	状态变量的边界确定和离散化	85
5.2.2	阶段 k 与 $k+1$ 间的转移	86
5.2.3	通过一般阶段 k 的概率转移矩阵	87
5.2.4	一般阶段 k 阶段末土壤含水量的概率累积函数	89
5.3	实际蒸散发量	91
5.3.1	在时段 $(0, k]$ 内期望的实际蒸散发量	92
5.3.2	实际总蒸散发量的方差	94
5.4	有控制系统阶段末土壤含水量和实际蒸散发量的概率分布	96
5.5	实例研究估算阶段末土壤含水量的概率累积函数和实际总蒸散发量的矩	103
5.5.1	概率转移矩阵	103
5.5.2	实例研究中阶段末土壤含水量和实际蒸散发量的矩的模拟结果和理论结果的比较	108
5.6	小结	118
第六章	作物生长季节灌溉水的最优分配	119
6.1	引言	119

6.2	目标函数	120
6.3	随机动态规划公式	123
6.3.1	无限制供水	124
6.3.2	有限制供水	125
6.4	给定控制规程的净效益的均值和方差	126
6.4.1	无限制供水条件下, 灌溉效益 $RT^1(N)$ 的均值	126
6.4.2	无限制供水条件下, 灌溉效益 $RT^1(N)$ 的方差	129
6.4.3	有限制供水条件下, 灌溉效益 $RT^1(N)$ 的均值和方差	131
6.5	实例研究的结果	133
6.5.1	经济系数	133
6.5.2	随机动态规划公式	135
6.5.3	通过模拟检验最优策略	138
6.6	小结	139
第七章	摘要、结论和研究方向	141
7.1	摘要	141
7.2	结论	142
7.3	建议和研究方向	143
	主要符号表	146
	参考文献	152
	附录摘要	164
附录A	在随机降雨输入和每一决策阶段之始 假定为 给定土壤含水量条件下的土壤水消退过程的模拟结果	164
附录B	在随机降雨输入条件下, 四个连续决策阶段均匀组 I 的土壤水消退过程的模拟结果	177
附录C	无限制供水情况和 $\beta = 0.016$ 美元/毫米的随机动态规划算法的结果	183
附录D	无限制供水情况和 $\beta = 0.16$ 美元/毫米的随机动态规划算法的结果	188
附录E	有限制供水情况和 $\beta = 0.016$ 美元/毫米的随机动态规划算法的结果	193
附录F	有限制供水情况和 $\beta = 0.16$ 美元/毫米的随机动态规划	

	算法的结果	204
附录G	具有最优随机控制和 $\beta = 0.016$ 美元/毫米的模拟模型的结果	215
附录H	具有最优随机控制和 $\beta = 0.16$ 美元/毫米的模拟模型的结果	226
附录I	确定性控制和 $\beta = 0.016$ 美元/毫米的模拟模型的结果	238
附录J	确定性控制和 $\beta = 0.16$ 美元/毫米的模拟模型的结果	250

第一章 导 论

1.1 灌溉水分配问题综述

灌溉农业是世界上最大的消耗性用水户之一，对它进行最优化管理可以节省大量的水。随着其他方面水的需要量的增加，灌溉成本的提高，灌溉者已认识到合理利用有限供水的迫切与重要。目前，灌溉方法与灌溉设施的不断革新（如喷灌、灌水中心、自动闸门、滴灌和电子仪器等的出现），已有可能更有效地控制灌溉水在时间与空间上的分配。

这项专题研究是：当灌溉的作物和规模确定之后，如何在整个灌溉季节里最好地分配有限的水量。也就是确定给定水量在什么时候灌和每次灌多少的问题。

研究这个问题，主要是了解和定量整个灌溉季节内作物对水分的响应。研究作物对土壤水压力响应的学者们〔91〕得出了一个极其重要的结论，即总产量既取决于生长季节的供水总量也取决于水量在全生长期内的分配。文献中所建议的多数作物模型，都认为能最恰当地描述土壤水压力对实际产量影响的有代表性的变量是蒸散发比（实际值与最大可能值之比）。因此，对蒸散发过程进行完整的描述，可将气候-土壤-植物系统间的关系结合起来。

实际蒸散发过程和水分向根区以下土层的渗漏过程决定了土壤水的消退。为了阐明蒸散发现象，必须研究土壤水平衡的全部过程。

因为降雨过程有随机性，所以在以降雨为重要供水水源的地方，土壤水平衡的内容是复杂的。不能认为总降雨量全部为作物

所利用, 其中一部分将作为地面径流和深层渗漏而损失掉。给定暴雨的入渗量是土壤入渗能力、灌区地形和暴雨强度与历时的函数。因此, 为了确定对土壤系统的随机输入量, 必须研究暴雨的出现、强度和历时的概率特性, 并作出入渗和土壤水消退过程的物理描述。

不仅土壤的入渗能力、而且实际蒸散发率和渗漏率也都决定于土壤含水量。为了阐明灌溉水的分配问题, 需要描述土壤含水量的概率特性, 因为它是确定土壤系统对给定输入水量的响应的状态变量。可把实际蒸散发量看作是与土壤水消退过程相关的现象。实际蒸散发量决定了某一生长期在作物总产量中所作的贡献。

总之, 这里所研究的是在考虑了作物对土壤水压力响应的季节变化性、土壤含水量的动态和降雨过程随机性的情况下, 把一定水量在全生长期内进行分配的问题。系统分析技术, 如模拟法和动态规划法, 过去已用于确定灌溉系统的最优运行策略。〔49、4、26、27、28、29、30、64、10〕一些现有的模型, 都是利用对不同初始条件系统的模拟, 计算每个决策阶段中土壤含水量的概率转移矩阵。不管怎样, 在定出土壤系统的随机输入水量的概率特性以及入渗和土壤水消退过程之后, 就可利用导出的分布, 以解析法求得阶段末土壤含水量的概率密度函数。我们把土壤水消退作为生成结构来确定实际蒸散发过程的阶矩。

为了求得给定运行策略下灌溉净效益的均值和方差, 导出的方程式是与作物模型相联系的。最后, 利用随机动态规划算法确定了灌溉用水的最优随机控制。

1.2 实例研究

这项研究利用布兰克 (Blank)〔10〕所描述的灌溉问题作为实例进行分析。

土壤水平衡和作物模型所需的一些参数是从科罗拉多州立大

学做的田间试验取得的。作物是早熟玉米品种 (Northrup King PX20), 1974 年种植在等深度的 Nunn 粘壤土上。

雨量资料取自科罗拉多州丹佛美国国家海洋及大气管理局 (NOAA) 第 05—2220 号站的历史记录。必要的经济系数是布兰克对科罗拉多州摩根堡灌区的经济分析得到的, 并为康克林 (Conklin)^[17]所采用。

把全生长期分成 15 个等长的决策阶段, 每段 8 天 (共 120 天), 求解了有限制和无限限制供水的灌溉水最优分配问题。

求出的阶段末土壤含水量、实际蒸散发量和净灌溉效益的均值和方差的表达式的有效性, 已为所研究实例地区的模拟结果所证实。对于无限限制供水, 随机控制所得结果与布兰克^[10]建议的固定日期确定性策略所得结果相比, 证实了随机控制是较优的。

1.3 各章要点

第二章描述了作物对总供水量和供水时间的响应, 介绍了现有作物模型的文献评述, 并利用已发表的试验资料讨论了所有模型的有效性。

第三章在分析了入渗、再分配、土壤蒸发、植物吸水和渗漏等过程之后, 提出并选用了—个一般的概念性土壤水平衡模型, 把根区土壤含水量与土壤水动态平衡中的所有有关过程联系起来。

第四章为土壤系统输入水分的降雨过程作了随机性描述。假定在给定时段内暴雨事件的次数、雨深、雨强和历时有一定的概率分布。以暴雨事件开始时的土壤含水量为条件, 求得了在给定暴雨事件过程中降雨入渗部分的概率分布。

第五章介绍了用离散状态和离散时间的马尔柯夫公式推导阶段末土壤含水量概率累积函数的方法, 并导出了实际蒸散发量的一阶和二阶矩。在认为每个决策阶段内的土壤水平衡为齐次马尔

柯夫过程的情况下，研讨了灌溉用水量对模型公式的影响。最后，导出了由灌溉控制的系统的阶段末土壤含水量和实际蒸散发量的计算通式。

第六章利用随机动态规划算法求解了灌溉水的分配问题，提出了无限制和有限制的两种灌溉供水情况的公式。在这两种情况下，求出了给定控制规程条件下净效益均值和方差的表达式。讨论了实例研究的结果，并进行了比较。

最后，第七章给出这项研究的提要 and 主要结论，并指出了进一步研究的方向。

第二章 作物模型

2.1 引言

研究灌溉水的最优分配问题，必须了解和定量全生长期内作物对灌溉的响应。某种作物的可能产量是气候、养分供应和管理水平等因素的极其复杂的函数。由于这些复杂性，求得水分和产量关系的最好方法是在保持非气候因素为常数的情况下，对每一特定地区和作物进行大范围的田间试验。

一些作者，其中包括穆尔 (Moore)^[77]、多夫曼 (Dorfman)^[24]、斯求厄特 (Stewart) 和哈根 (Hagan)^[92]、雅隆 (Yaron)^[100] 和民哈斯 (Minhas) 等^[76]，研究了决定产量函数形式的各个因素。这些研究中最重要结论之一是：某种作物的总产量基本上取决于全生长期的供水总量，然而也取决于这些水在全生长期内时间上的分配。

在讨论这一课题时，斯求厄特和哈根^[91]指出了在全生长期内水分配的重要性，因为许多作物都有“临界生长期”，在这个时期需水量往往是高的，同时对水压力的有害响应也相应地增大了。这就意味着由于缺水引起的产量损失，既取决于全生长期内土壤水缺少的总量，也取决于缺水发生在什么时候。图 2.1 是说明上述事实的一种一年生作物的理论生长曲线，在此时间与累积生长的关系图上，标明了发生在两个不同生长阶段的压力时期的相应影响。

从规划的观点出发，也就是为了对给定水库确定灌区最优面积，或为给定灌区面积确定水库最优规模，或确定两者同时最优，

最好能找到生长期供水与作物产量间的简单关系。雅隆^[100]曾求得这种形式的关系，并表示为全生长期内固定分配供水量的生产函数。许多学者，为求得这类作物生产函数所用的研究法，是依靠使不同的回归模型去拟合

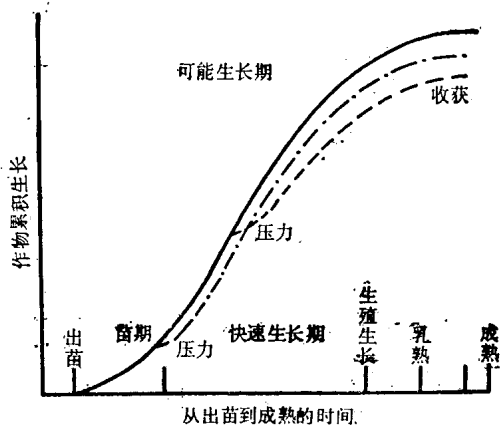


图 2.1 一年生作物的理论生长曲线
(引自[4])

试验资料。雅隆^[100]曾利用一些地方的高粱纤维的产量资料，得到了三次方或二次方的关系，这些地方由于生长期内供水的作用使得作物产量的变化精度高于 95% ($R^2 \geq 0.95$)。近来，海克森 (Hexen) 和黑笛 (Heady)^[56] 试图总结出灌溉农业的水量和产量的函数关系，以描述和分析美国几种作物和不同地区的一些回归模型。

另一方面，灌溉系统的实际定时运用，需要知道不同生长阶段（特别是临界生长阶段）的作物响应函数，使能更好地确定出灌水量在时间上的分配。知道了作物响应函数的这种型式，在考虑了随机降雨（不花钱的供水水源）输入的可利用率和在时间上的可变性以及作物在时间上对水压力的响应之后，就可实现灌溉水分配的最优控制。并从而求得分配有限制或无限制、但要花钱的灌溉水的最优运用规程。

过去，求这种复杂形式的生产函数是很困难的。而现在，正如斯求厄特等人^[95]所指出的，提出水和产量较精确的函数关系的技术障碍已经消除。利用中子仪可以精确地测量出以体积表示的不扰动田间土壤的含水量，同时现代大型激光仪可在每个生长

阶段精确地测量出作物每天的蒸散发量。

2.2 生长指标

光合作用是一种机制，它是植物利用日光、水和二氧化碳制造碳水化合物过程。通过植物的气孔，植物和大气进行气体交换。当水汽通过开着的气孔散发出去时，光合过程需要的二氧化碳则进入植物。散发率取决于大气条件、作物特性和土壤含水量。

土壤中可利用的水不能充分供给受气候控制的可能散发率需要的水分时，植物细胞的渗透压就会降低，并且关闭部分气孔以减少散发量，因之光合作用也减弱了。由于散发与生物的物质产量有关，所以散发量可以间接度量植物的生长。对于给定的气候、作物和土壤等条件的组合，散发最高时，光合作用也最强。

按定义，蒸散发量是土壤和植物表面蒸发和散发损失水量的总和。现有的许多作物模型是用蒸散发而不是用散发作为生长指标。这两个过程是密切相关的，并且从运算的观点出发，把蒸发和散发两个过程合并起来，可简化土壤-植物-大气系统水平衡的计算。

若干学者，如弗林 (Flinn)^[43]、席勒 (Hiler) 和克拉克 (Clark)^[57]、哈根和斯求厄特^[47]、道奈 (Downey)^[25]和雅隆^[101]，已经指出植物生长是导致植物水分压力各因素的函数。他们断定，当实际蒸散发率小于可能蒸散发率时则发生压力状态。当实际与可能蒸散发率相等时，可认为植物以最高速率生长。

已积累的大量资料支持了以实际蒸散发量作为作物生长代表量的设想。图 2.2 表示季节蒸散发量和高粱总产量的关系，是由斯求厄特等人^[94]求得的。图 2.3 表示两种不同品种玉米产量和全生长期散发量之间关系的试验结果，是由莫莱 (Morey) 等人^[78]得出的。在这两组试验中，全生长期蒸散发量、散发量与总产量之间的相关关系是明显的。