

土壤蒸发过程的 数值模型及其应用

杨邦杰 著

学术书刊出版社

土壤蒸发过程的 数值模型及其应用

杨邦杰 著

学术书刊出版社

内 容 提 要

本书讨论土壤蒸发过程的数值模型及其在旱地耕作工程措施研究中的应用。

内容包括：（1）一维土壤蒸发过程数值模型的建立与验证；（2）二维土壤蒸发过程的数值模型研究：对地表平坦的二维问题，考虑到非均质土壤水热运动参数不同，讨论了计算表面蒸发率与土壤水分温度分布的数值方法；当地表起伏不平时，考虑到起伏的沟壑对辐射与风的影响，提出了计算沟壑表面蒸发率与表面温度的数值方法；（3）土壤中水热传递过程的有限元分析与田间试验验证；（4）土壤水热参数的测定与计算方法；（5）耕作工程措施对土壤水分温度分布影响的计算机模拟分析方法：分析了镇压、少耕、沟种垄作对土壤水热状态的影响。

本书可供从事农业、生态、环境、地理、气象、水利、水文等研究工作的科技工作者，大学教师、学生、研究生，或从方法论上对模型及模拟有兴趣的有其它领域的读者参考。

土壤蒸发过程的数值模型及其应用

杨邦杰 著

学术书刊出版社出版（北京海淀区学院南路86号）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市密云县印刷厂印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：3.3125 字数：85 千字
1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷
印数：1—700册 定价：3.95元
ISBN 7-80045-642-0/X·7

前 言

土壤蒸发过程的研究在农业、生态、环境、地理、气象、水利、水文等方面有广泛的应用基础。本书讨论土壤蒸发过程的数值模型及其应用。土壤蒸发——这里指裸露土壤即裸地的蒸发。强调蒸发“过程”，是要分析水分在土壤中的运动以及表面蒸发这一复杂的动力学过程。数值模型——是指应用数值方法分析的数学模型。应用部分讨论这些模型在旱地耕作工程措施研究中的应用。

第一章绪论，介绍土壤蒸发过程的概念、研究进展以及本书的方法论与研究目标。第二章讨论一维土壤蒸发过程数值模型的建立与验证。第三章讨论土壤蒸发过程的二维数值模型：对地表平坦的二维问题，考虑到非均质土壤水热运动参数不同，讨论了计算表面蒸发率与土壤水分温度分布的数值方法；当地表起伏不平时，考虑到起伏的沟垄对辐射与风的影响，提出了计算沟垄表面蒸发率与表面温度的数值方法；第四章讨论二维模型的有限元分析：不规则边界非均质土壤的水热传递过程的有限元分析方法与田间试验验证；第五章讨论土壤水热参数的测定与计算方法。第六章介绍了模型的应用：讨论耕作工程措施对土壤水分温度分布影响的计算机模拟分析方法，分析了镇压、少耕、沟种垄作对土壤水热状态的影响，并对西北的垄沟种植耕作技术指标进行了分析。由此可以用于研究某一地区的适宜的旱地耕作方法。第七章是本书的结论部分。最后，在附录中给出了有限元分析中的公式推导。

本书是在作者近年来所进行的研究工作的基础上写成的。感谢北京农业大学曾德超教授的指导，感谢中国科学院地理研究所唐登银副研究员、陈镜明博士、谢贤群副研究员、陕西省延安地区农业机械研究所林顺道工程师的支持与合作。感谢清华大学水利系杨诗秀副教授的指教。没有他们的协助，这一项工作是

难以顺利进行的。

本书可供从事农业、生态、环境、地理、气象、水利、水文等研究工作的科技工作者，大学教师、学生、研究生，或从方法论上对模型及模拟有兴趣的其它领域的读者参考。为了在两年多的时间内完成从理论、方法到应用的系统研究，作者不得不对一些复杂的过程进行了简化，许多问题有待进一步讨论，望读者提出宝贵意见。

杨邦杰

1989年7月

于中国科学院生态环境研究中心系统生态室

目 录

前言

第一章 绪论

- 一、土壤蒸发过程..... (1)
- 二、研究进展..... (2)
 - 1. 关于土壤蒸发过程的研究..... (2)
 - 2. 关于土壤中的水热传递过程..... (3)
 - 3. 关于耕作对土壤水分与温度影响的数学模型..... (4)
- 三、模型、模拟与应用..... (5)
 - 1. 问题的提出..... (6)
 - 2. 土壤蒸发过程数值模型的设计与田间试验验证..... (6)
 - 3. 应用..... (6)

第二章 一维土壤蒸发过程的数值模型..... (8)

- 一、根据地表红外温度计算土壤蒸发率..... (9)
 - 1. 计算方法..... (9)
 - 2. 土壤表面蒸发阻力..... (10)
- 二、根据地表能量平衡方程式计算地表温度与蒸发率..... (11)
 - 1. 净辐射 R_n 的计算..... (11)
 - 2. 进入空气的显热 A 与蒸发率 E_s 的计算..... (12)
 - 3. 地表温度 T_s 的计算..... (12)
- 三、土壤中的水分与温度分布..... (13)
 - 1. 分析水分运动方程的单元水量平衡法..... (13)
 - 2. 土壤中的温度分布..... (16)
 - 3. 差分法的计算程序..... (16)
- 四、土壤蒸发过程的模拟程序..... (16)
- 五、田间试验与模拟计算结果比较..... (18)
 - 1. 田间试验方法与设备..... (18)
 - 2. 观测项目..... (19)
 - 3. 试验地的土壤参数..... (19)

4. 计算值与实测值的比较	(20)
六、小结	(24)
第三章 二维土壤蒸发过程的数值模型	(26)
一、地表平坦的二维土壤蒸发过程的数值模型	(26)
1. 数值模型	(26)
2. 计算程序	(28)
二、沟壑上的空气动力学阻力	(28)
1. 沟壑剖面的边界方程	(28)
2. 沟壑上的空气动力学阻力	(28)
三、沟壑上蒸发率的计算	(32)
四、沟壑上地表温度的计算	(33)
1. 沟壑上的辐射分析	(33)
2. 地表温度的计算	(35)
五、小结	(35)
第四章 土壤中水分与温度分布的有限元分析	(36)
一、控制方程	(36)
二、控制方程的有限元解	(38)
1. 空间域的离散	(39)
2. 时间域的离散	(41)
三、计算机程序	(41)
四、田间试验与模拟计算结果比较	(43)
五、小结	(54)
第五章 土壤参数	(55)
一、基础参数	(55)
二、水分运动参数	(55)
1. 土壤水分特征曲线	(55)
2. 扩散率	(56)
3. 导水率	(56)
4. 与温度梯度有关的水汽扩散率	(57)
5. 水汽在水势梯度下的当量导水率	(58)
三、热参数	(58)

1. 热容量	(58)
2. 导热率	(59)
3. 比辐射率	(61)
四、小结	(63)
第六章 耕作工程措施对土壤水分与温度分布的影响	(64)
一、耕作工程措施对土壤水分与温度分布影响的计算机模拟程序	(64)
二、镇压	(66)
1. 镇压对温度的影响	(66)
2. 镇压对水分的影响	(66)
三、少耕	(66)
1. 少耕对温度的影响	(67)
2. 少耕对水分的影响	(67)
四、沟种垄作	(67)
1. 不同沟深或垄高的影响	(67)
2. 风向的影响	(68)
3. 沟走向问题	(68)
五、西北地区的沟种设计	(68)
1. 输入资料	(69)
2. 标准气象资料的应用方法	(69)
3. 沟种工艺指标	(77)
六、小结	(78)
第七章 结论	(79)
附录 有限元分析中的公式推导	(81)
一、空间域的离数	(81)
二、时间域的离数	(86)
三、采用三角形单元时的算式	(87)
四、总体合成	(92)
五、解法	(92)
参考文献	(92)

第一章 绪论

一、土壤蒸发过程

土壤蒸发过程是指水分在土壤中的迁移以及在表面蒸发的这一过程。

土壤蒸发现象长期以来受到人们的关注。在干旱半干旱地区，水分不断散失会影响种子的发芽与出苗，水往往是作物产量的重要的限制因子。在地下水位较高的地区，土壤蒸发还可能导致土壤盐渍化。

生态学是研究生物与其环境的相互关系的学科，土壤一大气界面上水分与能量的交换过程——蒸发过程，影响土壤的温度与湿度，从而影响其它的物理过程、化学过程与生物学过程，这一现象是农业生态学关心的基础问题。农业气象学主要研究的范围，就其实质来说，也属于生态学的范围。环境科学的主要任务之一是研究对环境有重要影响的化学污染物在土壤中的种类、形态、转化、迁移过程，这也必须考虑土壤中的水热传递过程。

蒸发现象是地球表面热量平衡的组成部分，又是水量平衡的组成部分，而地表热量、水分的收支状况在很大程度上决定地理环境的性质与演变。在研究大气循环的模型中，陆地与大气的的水分和热量交换是一个重要过程，地表温度与蒸发量是为该模型提供边界条件的两个重要参数。

水文分析、水资源评价以及制定合理的灌溉与排水技术，都需要了解土壤水分动态。

土壤蒸发过程的研究在农业工程方面具有特别重要的意义。

全国约有50%以上的耕地没有或缺少灌溉条件，集中在我国北方干旱、半干旱以及半湿润易旱地区。例如黄土高原地区，年降雨量多在400~600mm之间，60~70%集中在七、八、九3个

月，冬春往往干旱，不利于种子发芽。作者多次到黄土高原地区调查耕作方法与耕作机具的设计与使用，结论是如果耕作工程措施（耕作方法与耕作机具）适当，确能保天上之水，供春天种子发芽之用。

耕层土壤的水分保持受到土壤质地、耕层构造以及境环等因素的影响，而耕层构造是人为的，是由耕播机具、耕作方式形成的。这一系列复杂的因素怎样影响土壤的水热传递过程？用什么样的耕作工程措施才能保证土壤有良好的水热条件供种子发芽？这些问题到目前为止只有观察与实验的结论，单凭实验难以揭示这一复杂过程的物理本质。中国幅员辽阔，土壤、环境很不一样，一时一地的实验结论也难于推广，给耕作方法研究以及耕作机具设计带来困难。在这些复杂的因素之间建立数学模型进行模拟研究，有可能对土壤水热传递过程与土壤质地、耕层构造、环境因素、工程措施之间的关系有深入的了解，为旱地耕作工程措施的研究提供科学的依据。在耕作机械的研究中，往往以减少耕作阻力保证碎土覆盖等工作质量为目标（杨邦杰，1985）。实质上，如何保证土壤有“最佳”的水热条件供种子发芽出苗，应当是一个重要标准。

另一方面，对土壤中传热传质过程的研究，也容易推广到其它多孔介质中去，而这一方面在工业技术上还有广泛的应用。

二、研究进展

1. 关于土壤蒸发的研究

长期以来，国内蒸发研究主要集中在农田蒸发（有植被的情况）与水面蒸发方面，研究的方法主要是实验测定或用经验与半经验公式计算，计算方面应用最多的是 Penman 公式（唐登银等，1984）。关于土壤蒸发的计算方法研究很少，傅抱璞（1981）根据对土壤蒸发过程的物理考虑和量纲分析，推导过计算各阶段

土壤蒸发的普遍公式。

土壤蒸发过程受到能量供给条件、水汽运移条件以及蒸发介质的供水能力的影响。影响蒸发的各因素相互影响，实验研究与经验半经验的解析方法难以描述这一动力学过程的物理本质。

由于影响土壤蒸发过程的因素较多，国外普遍采用数值分析方法。Van Bavel与Hillel (Van Bavel and Hillel, 1976) 提出的数值分析方法有坚实的理论基础，比用Penman公式估算蒸发率精度有较大的提高 (Monteith, 1981)。但是，由于没有考虑表面蒸发阻力以及温度对水汽运动的影响，不适用于表层土壤含水量较低的状况。

林家鼎等 (1983) 采用强迫—恢复法 (Force-Restore Method) 计算表面温度并提出了表面蒸发阻力的经验公式，但只适用于一维均质土壤，也没有考虑水热耦合运动。

Camillo等 (1983, 1986) 在土壤蒸发过程的分析中采用了Philip方程、并详尽地讨论了建立表面蒸发阻力经验公式的方法，但仍不适用于非均质土。

现有的方法都不能用于分析非均质、或起伏不平的耕层土壤的蒸发过程。

2. 关于土壤中的水热传递过程

要了解土壤蒸发现象，必须研究土壤水热传递过程。

关于土壤中水分运动的计算机模拟研究已有20多年的历史，D. Hillel (1977)、Feddes等 (1978) 在他们的专著中对一维问题进行了详尽的讨论，但没有考虑水热之间的相互影响以及水汽运动。国内对土壤中水分运动的模拟研究主要在农田水利方面，讨论均质土壤的等温入渗与蒸发过程，为制定合理的灌溉与排水技术提供依据 (杨诗秀等, 1985; 张思聪等, 1985)。在讨论入渗过程时，水分含量较高，土壤中水分运动以液态水为主，采用等温模型是可行的。但在研究水分的散失——蒸发过程时就不能不考虑水热的相互作用。在干旱半干旱地区，昼夜的温度循

环对苗床土壤水分变化、种子发芽的影响应当是很重要的。Philip等 (Philip and de Vries, 1957; de Vries, 1958) 提出了土壤中水热耦合运动的扩散型方程组, 并在研究均质土壤的蒸发过程中被广泛采用 (Schildge et al, 1982; Yoshisuki, Nakano et al, 1983; Camillo, 1983, 1986; Holzhei, 1985)。然而, 要用于讨论非均质土壤的水热运动还有待研究, 因为在非均质土壤中, 液态水的运动不是扩散过程。Taylor等 (Taylor and Cary, 1964; Cary, 1965) 根据不可逆热力学理论提出了土壤中水、热以及溶质运移的一般方程式。然而, 要用于工程实践却有困难 (de Vries, 1975)。

3. 关于耕作对土壤水分与温度影响的数学模型

在农业工程方面, 国外重视耕作对土壤水分温度影响的数学模型的研究, 希望应用模拟的方法来确定一个地区的适宜的耕作方法, 以提高作物的产量。M. A. Potter等在1982年就提出了这样的研究计划 (M. A. Porter et al, 1982)。

Francis I. Idike (1982) 研究了盆状沟种 (Basin tillage) 对土壤水分状态影响的系统模型, 预报玉米在整个生长期的土壤水分状态。然而, 这还是假定土壤均质的一维水分运动模型, 而且不涉及温度影响。S. C. Gupta (1984) 提出了用每天的最低与最高气温来预测不同耕作措施对土壤温度日变化的影响。这一模型没有揭示温度变化的物理本质, 难以引用, 而且不涉及水分运动对温度的影响。

在研究苗床土壤水分温度的数值分析方面, Holzhei (1985) 做了很好的工作。他以Philip与de Vries (1957) 提出的土壤中水热运动的基本方程为基础, 考虑到土壤大气边界上的水汽对流交换, 建立了苗床的水分温度模型, 模拟分析了苗床土壤3天的水分温度变化规律。然而他用扩散型方程来描述水分运动是不正确的, 蒸发边界条件的处理太简单, 而且也不能分析沟垄型苗床, 也没有进行田间试验。不过, 重要的是他提出了定量研究耕

作问题的思路。

Schaffer与Larson在1987年提出的NTRM模型也许是目前最为全面的耕作模拟模型 (A. Hadas et al, 1988), 但我们对这一模型的细节还不太了解。

在国内, 曾德超 (1985) 提出了土壤—机器—植物的基础关系研究: 旱作耕层结构蓄墒保土性能的数学模型及耕具系统优化设计的研究计划, 希望把耕作机具的设计方法建立在更为科学的定量化耕作工艺指标上。

要研究耕作对土壤水分温度影响的数学模型, 还有许多问题需要解决:

(1) 非均质土壤中的水热传递过程;

(2) 土壤—大气边界上水分与能量的交换过程更为复杂, 而这是分析土壤中水热运动的基础。国外对土壤蒸发过程的研究集中在—维问题上, 而耕作形成的耕层土壤不均匀或地表起伏不平, 其蒸发现象难以描述;

(3) 由于耕作形成的耕层土壤不均匀分布, 因而与水热运动有关的土壤参数也更为复杂。

三、模型、模拟与应用

Hillel (1977) 指出: “长期以来, 在科学研究中的主要趋势是注意那些可以孤立研究的个别现象或过程, 为了了解系统的机制, 仍要从这方面努力。但是, 如果仅限于研究人为划定的系统中的各个孤立方面, 就会忽略其它的重要事情 (例如相互作用), 也会使系统运转方式的概念过于简化。现在我们要把离散的有系统的知识汇总, 以便把系统作为整体而形成更广泛的概念。我们将用模型来完成它。”

我们要研究的土壤蒸发过程不仅仅是一种自然现象, 而且还有人类的干预 (耕作), 这一领域中多年来已积累了大量的实验资料。实验研究是必不可少的。然而, 面对这样一个复杂的多变

量系统，这些方法很难理解其相互作用的机制。本书要用模型来描述系统的结构，而用模拟（模型的运行）来研究变量间的相互影响，了解系统的功能，从而去优化系统的行为，得到应用的目的。

综上所述，本书要讨论的内容如图 1 - 1 所示。

1. 问题的提出

土壤蒸发现象是许多学科共同关心的问题。

2. 土壤蒸发过程数值模型的设计与田间试验验证

首先讨论一维问题，再讨论土壤非均质与地表起伏的二维蒸发问题。这些模型的设计是有理论基础的，只有在一些理论上还很模糊的问题上，才采用以实验为基础的统计学模型。为了讨论在特定的气候土壤条件下，不同的耕作方法对土壤水热条件的影响，必须解决以下几个问题：

(1) 要分析不同耕作条件下土壤瞬态的水分与温度分布，首先必须计算地表瞬态的蒸发率与表面温度，作为分析土壤中的温度与水分分布的边界条件，这将在蒸发过程的数值模型研究中解决；

(2) 要建立非均质土壤中的水热传递方程及其分析方法，为了求得数值解，还必须解决相应的水热参数的测定计算方法。

3. 应用

在解决以上问题的基础上，通过建立耕播机具作业形成的耕层土壤构造在大气边界条件下水热传递过程的数值模型，设计耕作对耕层土壤水分与温度分布影响的模拟程序，用以模拟不同的耕作方法对土壤水热状况的影响。从而为选择适宜的耕作方法，为耕作机具的设计提供依据，为研究旱地耕作工程措施提出新的分析方法。通过模拟分析，使我们对上述复杂的物理过程有更深刻的认识，同时对干旱、半干旱地区的农业研究也具有实际意义。

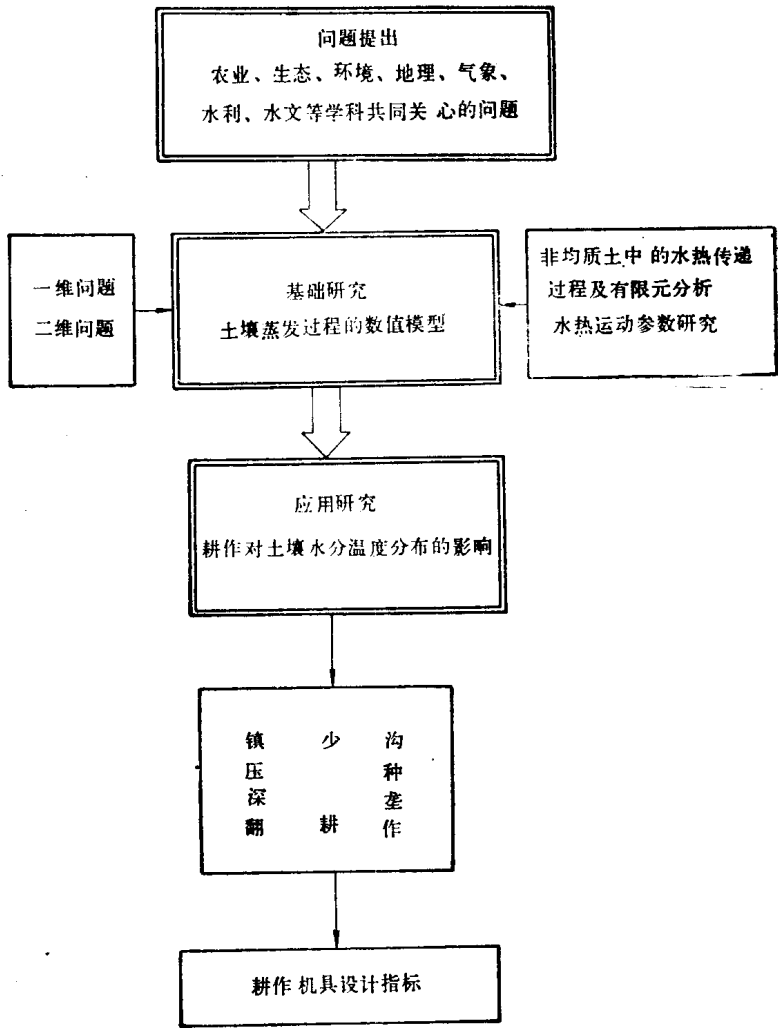


图 1-1

第二章 一维土壤蒸发过程的数值模型

土壤蒸发过程在一般情况下都可以用一维数值模型来描述。例如，大片均匀的耕地，假定土壤有相同的导水率与导热率，就可以用一维数值模型来描述。

首先讨论一维模型的目的是：

1. 土壤蒸发过程的一维数值模型表达了最为普遍的土壤蒸发现象，有广泛的应用前景。实际上，目前对蒸发现象的研究都是简化为一维问题来处理的。例如，要分析地表平坦的苗床土壤的水分与温度分布，首先就要计算土壤表面的蒸发率与地表温度。这可以归结为一维蒸发问题。

2. 一维数值模型是研究二维问题的基础。后面要讨论的二维数值模型是用一维模型推导出来的。有关土壤蒸发的一些基本问题要通过研究一维问题来解决。如蒸发率与蒸发量的计算方法可用蒸发渗漏仪 (Lysimeter) 实测值验证，土壤表面蒸发阻力要用实测蒸发率拟合。

本章以 Van Bavel 与 Hillel (1976) 提出的模型为基础，进行了以下工作：

1. 讨论用地表红外温度计算裸地蒸发率的更为简单而准确的方法。

2. 讨论根据地表能量平衡方程计算地表温度的方法，并提出相应的稳定求解的算法及程序。

3. 在计算一维蒸发时采用差分法，计算二维蒸发时用有限元法。传统的差分法处理通量边界条件时不能满足水量平衡条件。作者提出“单元水量平衡法”来建立非饱和土壤水分运动方程的差分格式，就能满足这一平衡条件，且容易处理分层非均质土壤的计算问题；

4. 引入土壤表面蒸发阻力公式，提出与耕作有关的土壤表

面发射率。

5. 用FORTRAN语言编写了模拟土壤蒸发过程的通用程序，这一程序有如下功能：

(1) 根据地表红外温度计算裸地蒸发率，分析能量分配过程，以及计算土壤中的温度场与含水量分布；

(2) 根据辐射资料计算地表温度和蒸发率，分析能量分配过程，以及计算土壤中的温度场与含水量分布；

(3) 模拟气象、土壤物理状态等因素对土壤蒸发过程的影响。

6. 进行了田间试验验证，以检验模型与程序的可行性。

一、根据地表红外温度计算土壤蒸发率

1. 计算方法

地表温度是表示蒸发过程中能量交换过程的一个特征量。在 Van Bavel与Hillel (1976) 提出的计算蒸发率的方法中，关键性的一步是根据辐射资料迭代计算地表温度 T_s 。迭代计算地表温度要详细地分析瞬时的能量平衡，涉及到气象因素、土壤水热运动参数、土壤中水分与温度分布等。影响因素太多，很难获得较准确的地表温度值。目前，利用红外测温仪却能很容易地测定地表温度。因此，根据地表红外温度计算裸地蒸发率简单易行，而且具有较高的精度，计算过程如下：

(1) 测定土壤温度与含水量分布的初值 T_0 ， θ_0 ；

(2) 测定风速 S_a ，空气温度 T_a ，空气湿度 H_a ，以及地表红外温度 T_i ；

(3) 计算空气动力学阻力

$$r_c = r_a \cdot S_i \quad (\text{s/m}) \quad (2-1)$$

式中 r_a 是 r_c 的绝热或中性条件下的空气动力学阻力值， S_i 是稳定度修正系数：