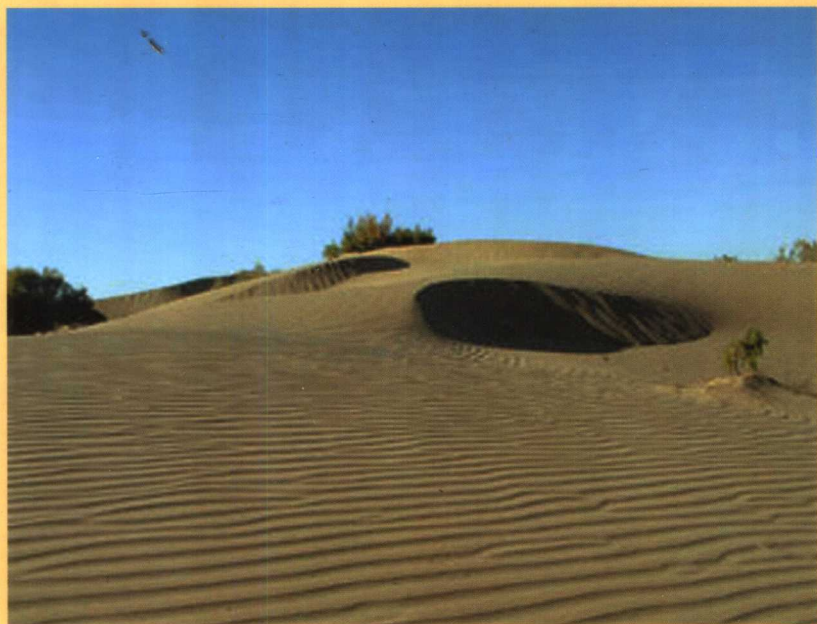


Water and Heat Balance and Its Coupling Simulation at
Transitional Region between Oasis and Desert

绿洲荒漠过渡区水热平衡规律 及其耦合模拟研究

王 兵 崔向慧 马全林 著



中国科学技术出版社

Water and Heat Balance and Its Coupling Simulation at
Transitional Region between Oasis and Desert

绿洲荒漠过渡区水热平衡规律

及其耦合模拟研究

王 兵

崔向慧

藏 书 章

中国科学技术出版社

• 北 京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

绿洲荒漠过渡区水热平衡规律及其耦合模拟研究 / 王兵, 崔向慧, 马全林著. —北京: 中国科学技术出版社, 2003.1
ISBN 7-5046-3447-6

I. 绿... II. ①王... ②崔... ③马... III. 林业—生态环境—研究—中国 IV. S718.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 110693 号

责任编辑 王 蕾
封面设计 姚 毅
责任校对 王勤杰
责任印制 李春利

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 62103202

北京市卫顺印刷厂印刷

*

开本: 850 毫米×1168 毫米 大 1/32 印张: 5 字数: 130 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 20.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 简 介

选择巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠交汇之处的甘肃民勤绿洲荒漠过渡区为研究地区，按风蚀荒漠化的主风方向设置包括红柳沙包、白刺沙包和流动沙丘 3 种不同植被覆盖梯度类型的实验样带，利用自动气象观测系统连续定位观测水、土、气、生等生态因子，研究分析其水热平衡变化规律，并分别对土壤—植被—大气连续体（SPAC）水热传输、交换以及绿洲荒漠过渡区土壤水热输移进行了耦合模拟研究，为该地区生态系统的水热结构优化模式以及荒漠化过程中能流、物流转化规律的研究提供了科学的理论基础。

本书可供在生态、水文、环境保护和荒漠化治理等方面从事科研、教学和工程技术工作的人员以及大专院校中环境保护、沙漠治理等专业的师生参考。

前 言

荒漠化是一个自然与经济、社会相关联，而以人为活动为诱导因素所引起环境变化的土地退化过程。荒漠化的严重后果是土地生产能力的下降、土地资源的丧失以及生态系统的脆弱性增加。土地荒漠化作为一个重要的环境和社会经济问题正困扰着世界各国。全球干旱区面积为 $61 \times 10^8 \text{hm}^2$ ，其中我国有 $2.97 \times 10^8 \text{hm}^2$ ，而且干旱区均发生不同程度的荒漠化。1984~1991 年，全球土地荒漠化以 3.4% 的年速率增加。随着全球气候的变化和人口的剧增，荒漠化问题将更加突出（慈龙骏，1997）。面对 21 世纪全球的资源与环境问题，生态系统失衡、环境恶化问题尤为严峻。生态系统的水热问题是生态学在环境研究方面的核心，已引起公众的注视，也成为世界各国专家学者研究的热点。

水分和热量从其发生学的观点来说，是两个独立的物理因子，并没有多少联系，都有各自独立的源，但在一个特定的系统内，其传播过程和对某一对象，特别是对土壤和大气的的作用过程上，却是相互联系与相互制约的。在生态系统中，水分和热量相互联系、互为影响。一个地区水分含量、水气的输送量以及水的相变，取决于地区的热力条件，而一个地区的水分分布变化，又会调剂和改变地区的热状况。水在全球范围内的运转，影响着大气环流与气候变化；水与热的相互作用控制着生物圈的形态，推动着各种物质在全球范围内的循环与交流，沧海桑田，无一不受水热的直接作用。因此，水热平衡是研究气候和小气候形成和变化机制的重要问题，也是维持现有陆地生态系统平衡稳定以及退化生态系统恢复的关键。

近年来,由于人口、经济快速增长的压力,水土资源矛盾日益突出,加上不合理的开发利用自然资源,产生草场退化、土地盐碱化、环境污染等一系列的生态环境问题,使得该生态系统的生态平衡严重受到威胁(蒙吉军,1998)。众多研究表明,水热条件对退化生态系统的恢复具有限制作用,退化系统恢复过程就是以水热为代表的环境条件逐步改善的过程(周国逸,1997)。因此,研究分析我国干旱区绿洲荒漠过渡区生态系统的水热状况及动态平衡变化规律,在调节水热资源的基础上充分提高水资源的利用效率,最终使水热结构达到最优模式,对该类型生态系统得以恢复与重建和防治绿洲荒漠化具有重要意义。

本书是在国家自然科学基金重大项目“荒漠化发生机制与综合防治优化模式的研究”的课题“荒漠化过程中的能流、物流转化规律的研究”基础上,经过作者认真修改、补充后完成的。

本书的研究技术路线和学术思想得到了蒋有绪院士、刘世荣研究员和北京林业大学余新晓教授等生态学家、文学家的热情鼓励和精心指导。在野外调查和实验过程中,得到了甘肃省治沙研究所、民勤治沙站等许多同志的大力协助。其中,王继和所长、高志海副所长、赵明站长等领导给予了大力支持和关注;纪永福工程师、刘虎俊工程师更是给予了无私的帮助。在此一并表示诚挚的谢意!

鉴于我们的水平和能力,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

王 兵

2002年12月于北京

目 录

1	研究进展与评述·····	(1)
1.1	荒漠化地区水热平衡规律研究的意义·····	(1)
1.2	荒漠化地区水热平衡规律研究进展与评述·····	(6)
2	研究地区基本概况·····	(18)
2.1	周边社区社会经济状况·····	(19)
2.2	气候特征·····	(20)
2.3	土壤类型·····	(21)
2.4	植被类型·····	(23)
2.5	水土资源状况·····	(26)
3	研究目标、内容、途径和方法·····	(32)
3.1	研究目标和内容·····	(32)
3.2	研究思路和步骤·····	(33)
3.3	技术路线·····	(33)
3.4	主要研究方法·····	(35)
4	绿洲荒漠过渡区水量平衡规律研究·····	(42)
4.1	绿洲荒漠过渡区水文学过程及特征·····	(43)
4.2	降水的时空分布·····	(45)
4.3	土壤水分时空格局及其动态特征·····	(48)

4.4	绿洲荒漠过渡区的蒸散特征分析·····	(58)
4.5	绿洲荒漠过渡区水量平衡分析·····	(74)
5	绿洲荒漠过渡区辐射特征与热量平衡规律研究·····	(76)
5.1	民勤绿洲荒漠过渡区辐射特征分析·····	(77)
5.2	绿洲荒漠过渡区土壤的热动态研究·····	(87)
5.3	绿洲荒漠过渡区热量平衡规律·····	(92)
5.4	小结·····	(98)
6	绿洲荒漠过渡区水热输移耦合模拟研究·····	(100)
6.1	SPAC 系统水热传输耦合模拟研究·····	(100)
6.2	绿洲荒漠过渡区土壤水热传输耦合模拟研究·····	(124)
7	结论与展望·····	(139)
7.1	结论·····	(139)
7.2	研究方向与展望·····	(143)
	参考文献·····	(145)

1 研究进展与评述

1.1 荒漠化地区水热平衡规律研究的意义

1.1.1 水资源的可持续利用

水是一切生物赖以生存和发展的基本条件，是人类生产生活不可缺少的重要资源和构成自然环境的重要因素。面对 21 世纪全球的人口、资源与环境问题，水资源问题尤其受到公众的关注而成为资源环境诸多问题的热点之一。由于缺乏对水资源及生态环境的保护意识，缺乏对水资源的合理分配和利用，目前世界各国均面临不同程度的水资源危机及生态环境的恶化，水少与水浪费并存、水多与生态失衡并存、水脏与水管不善并存等一系列水问题亟待解决。

由于气候条件复杂多样，自然地理位置千差万别，决定了水资源在分布上的不均匀和不平衡，主要表现在时间分布上的高度动态性、周期性、随机性和空间分布上的地带性和区域性（刘昌明等，1999）。我国腹地处于北纬 30° 地带，世界同纬度地带多为沙漠，而我国则有得天独厚的季风带来的丰沛降水，形成同纬度地带的巨大“绿洲”。但是远离海洋的西北内陆地区，降水稀少，是少水的荒漠区。历史和现实情况表明，西北地区社会经济发展的根本制约因素是水资源匮乏（见表 1.1）以及因缺水造成的十分脆弱的生态环境（高前兆，1996）。这些地区远离海洋，气候特点是：蒸发强烈，降水稀少，日照时间长，昼夜温差大。在长期的地质演变中，形成了以沙漠为主、沙漠与绿洲并存的格局。由于水资源的时空分布极其不平衡，与土地、矿产资源分布不相适应，特别是长期水资源利用效率低，浪费和不合理开发利用的现象经常发生，而且缺乏统一的管理和合理规划，上下游用水矛盾尖锐，污染相当严重，造成一些

地区出现湖泊萎缩、水源枯竭、土壤沙化、植被退化、土壤盐渍化等诸多生态环境问题，使得本已十分脆弱的生态环境更趋恶化。

表 1.1 西北干旱区部分地区水资源统计表

地 区	面 积 (10 ⁴ km ²)	降水 资源 (亿 m ³)	地表 径流 (亿 m ³)	浅层地下 水资源 (亿 m ³)	地表水 资源 (亿 m ³)	水资源 总量 (亿 m ³)	未开发 利用的水量 (亿 m ³)
北疆地区	44.9	1150.0	440.0	—	439.0	417.1	220.3
准噶尔盆地	—	—	127.0	108.0	—	139.2	—
南疆地区	119.8	1280.0	445.0	—	431.2	452.6	36.7
塔里木盆地	—	—	390.9	211.8	—	339.2	—
河西走廊	27.1	426.0	71.0	42.1	71.2	75.2	—
柴达木盆地	25.7	103.0	43.1	40.9	94.1	106.5	—
新疆东疆	—	15.3	18.1	14.1	20.9	20.9	—
总 计	312.4	5466.2	1432.4	424.6	1403.1	1511.9	—

民勤县境内惟一的地面水源石羊河，由于受气候条件影响，加之河流上游不断加大农田灌溉力度，使得输往下游的水资源不断递减。地下水方面，目前随着人口增加对土地压力不断增大，出现不合理开荒和大量开采地下水现象，造成地下水位的不断下降；另外开采出来用于灌溉的地下咸水，造成当地土壤盐渍化程度不断加重，盐渍化土地面积也呈面状由北向南扩展，使得绿洲边缘的植被防护带功能退化和迁移、退缩。截止到 1995 年，民勤县全县人均占有水资源量 865m³，667m²耕地均占有水资源量 239m³左右，属水资源匮乏地区。水资源的匮乏严重制约着绿洲农业的生存和发展，亟待采取有效措施加以解决。

对沙漠地区水资源状况的研究表明，只有加强宏观的管理规划，提高水资源的利用效率，合理开发利用，杜绝浪费和不良的人为破坏，才能充分发挥水资源的正面效益，克服由于水资源不足引发的

干旱、生态失衡等负面效益以及水资源污染等负面影响，才能实现该地区水资源的可持续利用。

1.1.2 退化生态系统的恢复与重建

国际上将退化生态系统恢复过程中的水分结构、水分平衡以及水热联系加以研究已成为热点。实际上，退化生态系统的恢复过程就是系统中各物种逐步协调与多样化、系统以水热为标志的环境条件逐步中生化，最后过渡到顶级群落的过程。在这个过程中，水分结构、水分平衡和水热联系是一个至关重要的问题。水热条件本身就是系统状况的反映，而各个阶段都有相对优化的水热结构模式。在这种模式下，系统能快速朝着顺行演替的方向发展。绿洲荒漠过渡区生态系统是整个生物圈中分布较广的一个系统，是陆地生态系统中一个特殊类型的子系统，由于其环境的严酷性决定了它的脆弱性和不稳定性。因此，掌握该类型生态系统水热状况的演变过程及其水热结构特点，找出优化的水热结构模式，对于防止荒漠化的蔓延与该系统的恢复与重建将有巨大的促进作用。

一般说来，退化生态系统的水热环境恢复可分为三个层次进行。首先，通过研究退化地各阶段包括地带性顶极群落的水热结构与平衡，以建立各阶段水热结构与水热平衡的最优模式。在此基础上，对各个阶段的相互转化，比如，由裸地到先锋群落，再到过渡群落以至顶极群落或相反的逆行演替等各个过程的水热结构变化机理加以研究。最后，应用人工调控方法找到能使各个演替阶段水热结构优化及防止生态系统水热结构退化的关键措施，以解决退化生态系统恢复过程中水热是限制因子的技术问题。

在以上的三个层次中，每个层次都较上一个层次有所提高，而每个层次又都是下一层次的实现所要解决的关键问题，因此为了达到如上的目标，必须选择好处于退化生态系统恢复过程中的各阶段代表群落，如极端退化的光裸地、自然和人工的先锋群落、自然和

人工的过渡群落,已基本稳定的群落和顶极群落;同时,在各阶段中,选择不同的退化生态系统类型,如顺行演替类型、逆行演替类型等以比较其水热结构与平衡的优劣性。

周国逸(1999)认为,对水热结构的研究应从几方面入手:①生态系统的水分平衡与热量平衡;②生态系统水热结构及其变化机制;③人为调控措施:分析各个措施下,水热结构的变化情况,对整个水分平衡、热量平衡的改变。如治理裸地的水土流失的工程及生物措施实施后,系统中各个尺度的水热环境的改变,并据此对此项措施进行评价;再如对先锋群落实行改造后所出现的水热状况的变化,对地表加以人工保护后,土壤水热环境及系统水热条件的改善等等。

我国西北干旱区气候干旱,具有光照资源丰富的优势和年降水量不足的特点,加上地形起伏较大,水热资源分布极其不平衡。荒漠地区反射率高,热能利用率低,自然植被产量小,造成太阳资源的严重浪费(徐文铎,1998)。这些地区的水资源极端匮乏,但由于人们节水意识差以及没有先进的技术导致该地区水分利用率相对较低,加上无节制的大量开采地下水,地下水位大幅度下降,使得地表植被退化,甚至大面积衰败或死亡,绿洲生态环境日趋恶化,以沙漠化和盐渍化为特征的荒漠化土地急剧扩展。就民勤地区而言,据民勤县林业局统计资料显示,由于超采地下水,加之沙丘水分不足而导致大面积防风固沙林出现衰败、死亡的面积就达 6.87 万 hm^2 ,其中包括 4.91 万 hm^2 天然柴湾的灌木林,1.22 万 hm^2 的沙枣林和 0.75 万 hm^2 的人工灌木林;此外,还有大面积的草场不断沙化。研究表明,荒漠化过程是绿洲生态系统的平衡失调,有限的水资源被大量无效消耗,光能资源得不到充分利用,生物机能退化,进而导致风沙、干旱和盐渍化加剧,生态环境出现恶性循环的过程。其中,水热因子则是该地区植被生长和发育的主要制约因子,同时也是阻碍生态系统恢复和重建的重要因素。因此研究绿洲荒漠过渡区水热平衡规律,了解水热联系过程的本质,掌握水热输移机理,对于寻求

生态系统的水热结构的最优模式有积极意义，有助于遏制荒漠化进程和该地区退化生态系统的恢复与重建。

1.1.3 干旱、半干旱地区 SPAC 系统水热交换与传输研究的意义

在生态系统水热平衡中存在两个基本的转换过程，即水分循环与热量交换。只有对系统内各个交界面的水汽和热量交换过程进行细致地研究分析，了解其本质特征，才能对整个系统的水热平衡规律有清楚的认识（刘树华等，1996）。澳大利亚著名水文学家 Philip（1966），提出了土壤—植物—大气连续体（SPAC）的概念。主要内容是，水分经由土壤到达植物根系，进入根系，通过细胞传输，进入植物茎，由植物木质部到达叶片，再由叶气孔扩散到空气层，最后参与大气的湍流交换，形成一个统一、动态的互反馈连续系统，即土壤—植物—大气连续体（SPAC）系统。这一系统概念不仅指明了微观研究方向，而且加强了水文学跨学科的研究。

水分的运移转化往往伴随着能量的迁移和消耗，水热运动是相互耦合进行的。研究土壤、植物、大气中的水热传输，就是希望能够系统、全面的研究水分在其中的迁移扩散以及伴随产生的热量转移。太阳辐射作为地表的能量源，到达陆地表面后，部分用于植物光合作用，部分以感热和蒸发潜热的形式返回到大气中，土壤—植被—大气系统内部这种能量和物质的传输转化过程控制着水循环与植物生长的微气候环境，对植物生产力的形成有重要影响。另外，地表与大气能量、水分的交换也代表了大气物理气候系统的下边界条件，准确地确定地表的水热通量并清楚地认识水汽和能量在边界层内的输送过程，对于理解气候及水分循环非常重要。

SPAC 系统水热输移是近地表圈中物质迁移与能量转化的重要组成部分。该系统中，土壤的水热状况、群丛的蒸腾蒸发及群丛所处的小气候条件三者是互相影响、互相制约的（吴肇龙等，1996）。对干旱、半干旱地区土壤—植物—大气连续体水热传输和交换机理的

研究与数值模拟,不但可以确切反映出蒸腾蒸发与土壤水热状况的相互制约关系,使绿洲荒漠过渡区植被蒸散的研究更加深入,也可得到有关地表能量分配、地表蒸发及显热交换和土壤水分分布等规律,有助于干旱区地表蒸发规律的研究和农田节水灌溉机制的研究,从而可以掌握该地区生态系统水热平衡规律,为寻求水热结构优化模式奠定理论基础。

1.2 荒漠化地区水热平衡规律研究进展与评述

1.2.1 荒漠化地区水量平衡规律及水分动态研究

在荒漠化地区的生态系统中,水分与系统大多数性质和过程都有直接或间接的关系。它不仅是该系统植被生长发育的主要限制因子,植物种群组成与分布,甚至动物种群及其生活习性在时间和空间上的差异也都与之密切相关(D Evans, 1981)。充分、合理地利用该系统有限的水资源,对提高系统生物多样性、荒漠化防治以及合理开发和利用荒漠化土地有着重要意义,而研究掌握该系统水资源状况、水循环特点以及水量平衡规律与水分传输等一系列问题则是关键。

由于水在荒漠化地区的重要地位,因此对水量平衡与水分循环都有较多的研究,包括从定性与定量分析,短期与长期调查观测以及对系统水分的模拟预测。在干旱、半干旱区关于植物群落水分变化特点与水量平衡规律研究的较多。杨文斌(1991, 1992)对干旱区风沙土的水分动态规律、固沙林的土壤、植物水分关系以及蒸发、蒸腾规律进行较为全面系统的研究,认为光照强度和土壤含水率是影响蒸腾速率的两个主要因子。韩德儒(1995)在此基础上,按照土壤蒸发的水热原理,从统计学角度出发,建立了一个用于模拟人工柠条固沙林群体与环境构成的 SPAC 系统的水量平衡动态模型,并对柠条林生长期的水量平衡进行了分析。李银芳等(1995)采用非称重蒸渗仪对箭杆杨、梭梭柴群落的水量平衡各分量变化规律进

行了探讨,分析了灌溉对水分循环的影响,并初步确定了箭杆杨的合理灌溉指标。冯金朝等(1995)则运用大型称重式电子蒸散系统研究了腾格里沙漠地区人工植被生态系统的蒸散耗水与水量平衡,并对沙地植物水分平衡各分量的比例关系以及环境条件变化所产生的影响进行了探讨。结果表明:降水是保证植物固沙成功的基本条件,在正常年份,植物蒸散耗水量大于降水量;降水的时空分布和地表结皮的形成对植被水量平衡与水分利用产生较大影响。众多研究表明,在荒漠化地区植物群落的水量平衡中,降水与蒸散是其中重要的组成部分,但 Caldwell (1983) 调查后认为,许多植物有控制蒸腾的能力,在长期无雨的情况下,荒漠植物单位面积的蒸腾量是比较低的,降水是主要靠直接蒸发消耗掉的。

在荒漠化地区的水量平衡中,除了降水、蒸散外,土壤水分无疑作为其中重要的分量因子而被加以研究。荒漠地区土壤表面的微地形通常起伏不平,低洼的地方能容纳水分,水分在土壤表面的保持和停留,减少了地表径流,但使水分入渗的时间增加,从而影响到降水后土壤水分的时间与空间变异性增加。加上荒漠地区气候干旱,降水稀少,且季节分配不均匀,所以土壤水分动态一直是研究的重点问题。近年来,有关学者对荒漠区土壤水分状况及其动态变化特征进行了很多研究工作。张国盛(1999)对毛乌素沙区的土壤水分进行了研究,结果表明:沙丘表层土壤的水分存在季节性变动,一般春季土壤含水量是上半年的峰值;在沙地,植被根系主要分布在 0~40cm 的土层中,因此表层土壤水分含量与根系分布有密切关系,根系的存在是造成土壤水分的空间变异程度加大的重要原因之一。

D Evans (1981) 研究认为,荒漠化地区土壤水分入渗速率与许多因子有关,这些因子包括土壤初始含水量,土壤质地,植被和枯枝落叶,以及降雨强度和持续时间。土壤表面的水分向下湿润的深度一般较浅,通常在降雨以后土表立即开始蒸发,湿润层的含水量

由于蒸发和向下再分配而减少。虽然植物下面的土壤表面通常比植物与植物之间的土壤表面高,但由于土壤特性的关系,植物下面的土壤渗吸速率一般都比较大,因此就不像植物与植物之间的土壤表面那样经常积水。洼地积水对侵蚀、沉积以及种子的分布都可能有很大影响,这些反过来又影响植物分布。另外,一般有植被分布的土壤表面都有一定厚度的生物结皮,结皮的存在增加了地表对降水的截留,减小了水分的入渗速率,因而也就增大了土壤无效蒸发在系统水量平衡中的比例,使得深层土壤水分得不到补给。

此外,对荒漠生态系统蒸散特征的研究也很多。如 K Kotoda (1982)、S Nakagawa (1984) 分别研究了荒漠农田、牧草地的蒸腾日间变化, A U Sorman (1995) 计算了干旱气候条件下的蒸发日间变化。李新 (2000) 研究认为,干旱区农田生态系统的蒸散量取决于土壤含水量、地下水位和作物生长状况,而蒸发量的日变化与风、空气温湿度等因素有关,年变化则与气温关系密切。李品芳 (2000) 针对毛乌素沙地水资源的高效利用问题,主要探讨了干沙层的形成及其对土壤水分蒸发特性的影响以及草地的蒸散量。结果表明沙丘的水分蒸发量主要取决于干沙层的厚度和地温的高低,并利用干燥表层法模型简单求算,结果是蒸发速率的平均值约为 0.04mm/h ,日平均蒸发量为 1mm (夏季),同时在毛乌素沙地进行了草地蒸散量的实地测定,其值远远大于沙土的蒸发量。

1.2.2 荒漠化地区生态系统的水热传输与交换研究

在生态系统水热平衡中存在两个基本的转换过程,即水分循环与热量交换。只有对系统内各个交界面的水汽和热量交换过程进行细致地研究分析,了解其本质特征,才能对整个系统的水热平衡规律有清楚的认识。

1.2.2.1 土壤中的水热运移

土壤中水、汽、热运移规律的研究对荒漠化地区蒸发蒸腾过程

中能量转换及质量迁移的机理、提高水资源利用效率以及了解当地小气候条件等方面具有重要的理论和实践意义。

在土壤中,水分迁移与热量传输是两个相互作用的过程,既所谓水热耦合。关于土壤水热耦合,有两种独立的分析方法:第一,基于多孔介质中液态水粘性流动和水蒸气扩散的理论及热量平衡原理,Philip 和 De Vries (1957)提出了水热耦合下土壤水分迁移与热量传输的基本方程,即机理法;第二,基于不可逆过程热力学原理,Cary 和 Taylor (1960~1964)给出了描述土壤水热通量的方程式,即热力学法。Groenevelt 等 (1969)、Jury (1973)的研究表明,虽然两种方法出自于不同观点,但它们仍互为关联,可融于一等价模型。相比之下,由于机理法概念更为明确、清晰,在土壤水动力学领域,多用该法描述土壤的水热迁移。

早期的土壤水流和热流的研究,是各自独立进行的。对于地下水的研究,始于法国的 Darcy。1856 年,他根据饱和沙土渗透试验,得出渗流量与水力梯度成正比的结论,即著名的达西定律。1907 年,Edgar Buckingham 对达西定律做了修正,使之适用于非饱和土壤,得到 Buckingham-Darcy 流动定律。1931 年,Richards 将质量守恒原理(连续方程)和 Buckingham-Darcy 流动定律结合起来,得到非饱和土壤水运动的基本方程(Richards 方程):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot q = \nabla \cdot (K \nabla \psi) \quad (1-1)$$

其中, q 为水流通量, ψ 为土壤水势, K 为土壤的非饱和导水率, θ 、 t 分别为土壤的含水量及时间。

土壤热流的研究始于 20 世纪 40 年代末。De Vries 将 Fourier 导热定律应用于土壤,并根据能量守恒原理,可得到土壤热流的基本方程: