

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.003

# 土体水分蒸发研究进展

欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 徐士康, 施 斌

(南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 201023)

**摘 要:** 土体水分蒸发是土体-大气物质和能量交换的主要过程之一, 对土体的工程性质有重要影响, 是许多工程和环境问题的直接诱因, 但长期被本学科所忽视。基于国内外近些年来其他学科领域围绕土体水分蒸发问题所取得的研究成果, 分别从土体蒸发量确定方法、试验方法、蒸发过程、影响因素及理论模型等几个重要方面总结了该课题的研究现状及进展, 取得如下主要认识: (1) 准确确定土体的实际蒸发量是土体水分蒸发研究的核心课题, 目前主要有理论计算法和直接测量法两种途径; (2) 开展蒸发试验是掌握土体水分蒸发过程和研究土体水分蒸发机制的重要途径, 目前主要有室内试验和原位试验两种。相比而言, 基于环境箱的室内蒸发试验方法具有较好的应用前景; (3) 土体水分的蒸发过程可划分为 3 个阶段: 常速率、减速率和残余阶段; (4) 影响土体水分蒸发的因素归纳起来可分为内部土性和外部环境因素两类, 前者主要影响土体水分的传输能力, 后者主要影响蒸发能量的供应强度; (5) 当前关于土体水分蒸发量的计算和预测模型较多, 但往往存在误差大、适应范围窄或参数难于获取等不足。基于上述认识, 并结合本学科的研究背景, 提出了今后该课题的研究重点和方向, 包括减速率阶段的蒸发机制、土性参数与蒸发速率之间的量化关系、黏性土尤其是膨胀土中水分的蒸发和迁移机制、高精度原位土体水分蒸发试验设备的研发和构建通用型的土体水分蒸发理论模型等。

**关 键 词:** 土体水分蒸发; 土体-大气相互作用; 试验方法; 蒸发过程; 影响因素

中图分类号: TU 441<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)03-0625-13

## Advances on soil moisture evaporation

OUYANG Bin-qiang, TANG Chao-sheng, WANG De-yin, XU Shi-kang, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** Soil moisture evaporation is one of the main processes of mass and energy exchange of soil-atmosphere, which has an important influence on soil engineering properties. It is also the direct cause of many engineering and environmental problems, however, this issue has never been taken into account in geoenvironmental disciplines. Based on the recent research achievements on soil moisture evaporation in other disciplines, the advances of some important aspects on this topic, i.e. soil moisture evaporation capacity determination, test method, evaporation process, influencing factors and theoretical model, are summarized and shown as follows: (1) To accurately determine the actual evaporation capacity of soil is one of the most important tasks in soil moisture evaporation study. Generally, there are two categories of methods: theory calculation and direct measurement; (2) To carry out evaporation test is an important approach to understand soil moisture evaporation process and the related mechanism. There are two categories of tests: laboratorial test and in-situ test. As compared, evaporation test by environmental chamber has better application prospect; (3) Soil moisture evaporation process can be divided into three stages: constant rate, falling rate and residual rate phases; (4) The factors influencing soil evaporation can be categorized as internal soil factors and external environmental factors. The former one mainly affects soil moisture transportation characteristics, and the latter one mainly influences evaporation energy supply intensity; (5) Many soil moisture evaporation calculation and prediction models have been proposed, however, they show some disadvantages such as large errors, narrow range of adaptation or difficulties on parameters acquisition. Based on the above understanding, and to combine with the research background of geotechnical and geological engineering, some important research topics that should be well investigated in future are proposed, including the evaporation mechanism of falling rate stage, the quantitative relationship between the soil properties and evaporation rate, soil moisture evaporation and transportation mechanisms in clayey soil especially in expansive soil, development of high precision in-situ soil moisture evaporation test apparatus and construction of universal soil

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 优秀青年科学基金项目 (No.41322019); 国家自然科学基金项目 (No.41572246); 国家自然科学基金重点项目 (No.41230636); 江苏省“青蓝工程”; 中央高校基本科研业务费专项资金。

This work was supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Scholars (41322019), the National Natural Science Foundation of China (41572246), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (41230636) and Qing Lan Program of Jiangsu Province and Fundamental Research Funds for the Central Universities.

第一作者简介: 欧阳斌强, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事工程地质与环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 574876512@qq.com

通讯作者: 唐朝生, 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事工程地质和环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

moisture evaporation theoretical model.

**Keywords:** soil moisture evaporation; soil-atmosphere interaction; experimental method; evaporation process; influencing factors

## 1 引言

土体水分蒸发是土体-大气物质和能量交换的主要过程之一,也是地表热量与水分平衡的重要组成部分<sup>[1-6]</sup>。对于自然界的土体而言,蒸发的驱动力来自气候作用,尤其是干旱气候作用。由于蒸发会改变土体中水分的含量和分布,进而导致土体的工程性质发生变化,许多工程和环境问题都直接或间接与蒸发有关。

如在蒸发作用下,土体会发生收缩变形,引起地面沉降,从而对地面上的基础工程设施产生破坏<sup>[7]</sup>

(见图 1(a))。Silvestri 等<sup>[8]</sup>发现,因持续干旱,建于加拿大 Champlain 黏土上的许多建筑物都出现沉降变形甚至开裂的现象;20 世纪 70 年代末我国南阳地区和 90 年代初欧洲地区遭遇严重干旱,大规模房屋地面不均匀沉降而开裂受损,造成巨大经济损失<sup>[9-10]</sup>(见图 1(b));2010 年我国西南地区遭遇百年一遇的特大干旱,昆明国际机场跑道和多条高速公路出现大面积破损,根本原因也是由于干旱蒸发导致地基土发生了显著的收缩变形。其他类似与干旱蒸发相关的工程问题在亚洲、欧洲和北美洲等世界许多地区均有较多报道<sup>[11-12]</sup>。

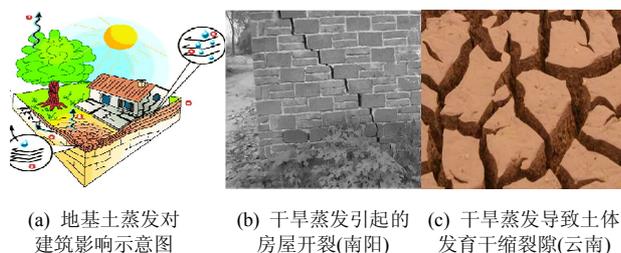


图 1 与干旱蒸发相关的工程问题

Fig.1 Induced engineering problems by evaporation

当蒸发到一定程度时,土体中还会发育大量干缩裂隙,即自然界中常见的土体龟裂现象(见图 1(c))。干缩裂隙的出现会极大弱化土体的工程性质,为灾变的发展提供有利条件。如在土质边坡中,干缩裂隙会破坏土体的整体性,降低边坡的稳定性,并为雨水入渗提供通道,诱导滑坡灾害的发生<sup>[13]</sup>。干缩裂隙还会成倍增加土体的渗透性,对水利工程产生负面影响。2007 年我国重庆地区遭遇的特大旱情使 1200 座水库大坝严重开裂,稳定性降低,直接面临暴雨来临的威胁。在城市垃圾卫生填埋场的设计过程中,由于对蒸发因素考虑不足,导致膨润土

隔离系统开裂失效的例子屡见不鲜<sup>[14]</sup>。在核废料地质处置库中,核废料衰变热引起的高温会导致膨润土缓冲回填材料干缩变形甚至开裂,从而扩大膨润土砌块之间及砌块与围岩之间的缝隙,为库外地下水入渗及库内放射性核素向外扩散迁移提供快捷通道<sup>[15-17]</sup>。张茂省等<sup>[18]</sup>在研究中指出,前期干旱蒸发导致表层松散堆积碎石土裂隙发育是舟曲“8.8”特大泥石流的重要原因之一。此外,在干旱和半干旱地区,蒸发是土壤盐碱化和荒漠化的主要驱动力,对农业生产和生态环境带来严重的危害,还会弱化土体的工程性质<sup>[19]</sup>。

由此可见,土体水分蒸发问题涉及地质、岩土、水利、道路、环境、大气等多个学科领域,具有一定的普遍性。尤其是近些年来,受全球气候变化的影响,极端干旱气候频繁发生,相关灾害越来越突出,经济损失也越来越巨大。据中国气象局的资料统计,近 20 年发生严重干旱灾害的频率比前 40 年提高 80%,全国干旱灾害造成的年均经济损失约 1 526 亿元,约占同期全国年均 GDP 的 1.47%,是洪涝灾害造成经济损失的 1.5 倍,抗旱减灾工作形势愈加严峻。然而,在岩土工程和地质工程领域中,与土体-气候相互作用有关的研究主要局限于强降雨诱发滑坡、泥石流、崩塌、溃坝等地质灾害方面,关于干旱蒸发问题的研究几乎尚未起步,代表性的研究成果非常鲜见。国际上已有的关于土体水分蒸发方面的研究成果主要局限于农业、土壤和大气科学领域,但由于研究背景和目的不同,相关成果还难以直接服务于本学科。显然,对该课题的认识不足,已严重影响了岩土力学和工程地质学界对干旱环境中土体物理力学行为的正确把握和灾变过程的正确理解,给相关灾害的防治带来盲目性。

本文着重以农业、土壤和大气科学领域围绕土体水分蒸发问题所取得的研究成果为基础,分别从土体蒸发量确定方法、试验方法、蒸发过程、影响因素及理论模型等几个重要方面对该课题的研究现状及进展进行了介绍,并结合本学科背景,提出了未来该课题的研究重点和方向。本文工作有助于工程领域的科研人员更全面地认识土体水分蒸发现象及其本质,为后续相关课题的研究尤其是开展交叉学科研究和抗旱减灾工作提供必要参考。

## 2 土体水分蒸发量确定方法

确定自然界土体在大气作用下的实际蒸发量一直是农业、土壤和大气科学领域的研究重点和难点,也是该课题研究的核心。对于工程中的土体而言,蒸发量的大小直接影响含水率的变化幅度及工程性质。因此,准确掌握土体在大气作用下的实际蒸发量对预测土体工程性质响应特征有重要意义。

目前确定土体水分蒸发量的方法主要有两种:理论计算法和直接测量法。对于前者,国内外学者通过开展大量研究,提出了许多关于土体蒸发量计算的模型或理论公式(具体将在后文介绍)。根据蒸发量的确定原理,可将常用的理论计算方法或以理论计算为基础的方法分为如下几种:红外遥感法、水文法和微气象学法等。表1归纳总结了各种方法的基本原理、适应条件和优缺点<sup>[20]</sup>。

除了理论计算,也可对土体水分的蒸发量进行

直接测量。土体蒸发过程的本质是水分在土体与大气之间的液气转换过程。因此,蒸发量测量既可以基于液相也可以基于气相进行<sup>[21]</sup>。当在液相中进行时,主要通过构建一个密闭环境,测试液态水分的消耗量,确定蒸发速率或蒸发量,常见的有水分平衡法、蒸发皿和蒸发池法、蒸发渗透仪、植物生理测定技术等。当在气相中进行时,主要通过测定乱流边界层进入开放系统的水汽流的速率,进而确定相应的蒸发量,如涡度相关法等<sup>[22]</sup>。涡度相关法是通过特制的涡动通量仪对下垫面的潜热以及显热的湍流脉动值进行直接测算,以此得出土体及植被蒸发蒸散量的方法。涡度相关法优点是其物理理论基础坚实,而且测量的精度较高。缺点是该方法采用直接测定技术,对土体蒸发的物理过程以及影响机制分析不够充分,而且涡度相关法所用的仪器复杂、制造困难、成本高、维护难,目前涡度相关法并不是土体蒸发量测量的常用方法<sup>[23]</sup>。

表1 常用的土体水分蒸发量的理论计算方法  
Table 1 Summary of theoretical calculation of soil water evaporation

方法名称	基本原理	适用条件及优缺点	参考文献	
红外遥感方法	通过飞机或卫星进行高空遥测,获取反射率、地表温度以及地表光谱等参数,再结合地面气象、土壤要素以及植被状况的观测,计算大区域的土体水分蒸发量。	具有多光谱、多时相等特征,能够对下垫面的物理性质以及几何结构进行综合反映,精度高,适用于大区域的蒸发量计算。	[24]	
水文法	水分运动通量法	以土体水分运动为基础,综合土体的物理状况,一般分为零通量法和定位通量法两种。	零通量法一般适用于地下水位较低或水位变动较少的情况;定位通量法可用于零通量面无法确定时计算蒸发量或入渗量。	[25]
	水量平衡法	根据一定时间内土层中水量的收支平衡来确定蒸发量。	适用范围广,优点是不受气象条件限制,缺点是难以确定有效降水量以及地下水补给量。	[26]
微气象学方法	能量平衡-空气动力学综合法	基本假设:蒸发面处的气温处于饱和状态,观测面同时考虑了影响土体水分蒸发的植被生理和大气物理特性,和蒸发面的气温相等。根据观测面的气象观测资料计算蒸发量。	该方法只适用于地面完全覆盖低矮植被条件下的土体水分蒸发测算,且难以将植物蒸腾和土体蒸发分开计算。	[27-28]
	波文比-能量平衡法	基本假设:空气动量扩散系数、水汽湍流扩散系数与热量扩散系数相等。通过估算潜热通量来确定蒸发量,分析太阳净辐射与蒸发的关系,揭示主要影响因素变化对蒸发的影响和不同地带蒸发的特点,但只有在均一开阔的下垫面条件下才具有较高的精度。		[29]
空气动力学方法	基本假设:水气压、近地面温度和风速等物理参数的垂直梯度都受大气传导控制。根据湿度、温度和风速的梯度及廓线方程确定蒸发量。	需要严格的下垫面条件及气体稳定度,在平流逆温的非均匀下垫面下梯度扩散理论不适用,难以推广。	[30]	

## 3 土体水分蒸发试验方法

土体水分蒸发受土体-大气交界面处气象参数(温度、相对湿度、太阳辐射、风速等)和土体自身参数(含水率、密实度、矿物成分、温度梯度、吸力等)的共同作用。因此,对土体蒸发机制和蒸发过程进行系统、深入的研究,并达到实时准确地获得土体的实际蒸发量的目的,就需要对上述参数的变化进行精确控制和测量。过去几十年来,国内外学者提出了一系列土体水分蒸发试验方法,并开发了相应的蒸发试验装置,归纳起来可分为两类:室内试验和原位试验<sup>[31]</sup>。

(1) 室内试验:室内试验对土体蒸发的测定主要依据土体所损失的质量等于土体水分蒸发量的原理,围绕土体蒸发过程中的质量差来展开的。主要手段是称重或者传感器监测<sup>[32]</sup>。随着研究的深入,模拟各种大气环境参数(风速、温度、气压、太阳辐射等)的综合蒸发试验也在不断进行,对土体蒸发过程、蒸发机制的研究取得了不少的成果。关于各种室内蒸发试验方法的基本原理和优缺点可参见表2。

土体水分的质量差测定主要有蒸发皿法和土柱(盒)蒸发法等,这些方法是目前最常规最普遍的室内测定土体水分蒸发量的方法,其他各种相关室

内蒸发试验方法一般都是以此为基础改进的,比如通过附加装置改变或控制试验环境及条件,或安装其他传感器增加检测参数等。综合蒸发试验主要有环境箱模拟法和风洞试验法等,它们都能模拟复杂气象条件,为土体水分蒸发机制研究提供了重要途径。但考虑到参数控制、运行成本和试验可操作性等方面,环境箱试验应该是上述蒸发试验方法中最具前景和最具推广价值的方法。

(2) 原位试验: 原位试验所用到的试验仪器主要有蒸渗仪和微型蒸发器。蒸渗仪主要用于现场测定土体的水分蒸发量,可分为称重式和非称重式两种类型。称重式蒸渗仪主要通过直接称重,测量短

时间间隔的蒸发数据,再结合相关的水量平衡方程计算出土体的蒸发量,一般具有较高的精度。但该方法成本较高,且其底部阻止了水分的流动,与现场实际情况不符。非称重式蒸渗仪通过对地下水位的控制,测定补偿水量进而确定土体蒸发量<sup>[41]</sup>。

微型蒸发器法(micro-lysimeters, 简称为MLS)主要由 Boast<sup>[42]</sup>等在1982年提出,20世纪90年代中、后期王会肖<sup>[43]</sup>等此方法引进国内,并得到推广<sup>[44]</sup>。微型蒸发器法具有成本低,操作简便的优点,目前已成为室外测量土体水分蒸发量的常用方法,许多学者还设计了其他各种改进型的微型蒸发器<sup>[45-47]</sup>。

表2 土体水分蒸发室内试验汇总

Table 2 Summary of laboratory experiment methods of soil evaporation

类别	试验方法	基本原理	使用条件及优缺点	参考文献
确定“质量差”试验	蒸发皿试验	通过监测蒸发皿的质量变化确定蒸发量,并且还可以根据水位变化确定蒸发速率	主要用于研究有充分水分供应土体蒸发量及自由水面蒸发。测量结果受装置结构及尺寸影响较大	[32]
	土柱(盒)蒸发试验	直接测量土柱质量损失,得到水分蒸发量	所测参数比较单一,受重量测量装置精度的限制,一般无法进行大尺度土柱蒸发试验	[33-36]
综合蒸发试验	环境箱试验	通过构建稳定的环境条件,采用各类传感器监测环境箱内的大气参数及土体参数,进而计算或测所测参数丰富,运行成本相对较低且操作简便。得土体的蒸发量		[37-38]
	风洞试验	通过精确控制大气参数(风速、辐射量、温度、能够稳定地控制大气参数,能对土体水分蒸发湿度)并结合蒸发测量装置研究土体在不同大气过程进行全面监测。但是成本较高,操作较为条件下的蒸发量	复杂。	[39-40]

## 4 土体水分蒸发过程

土体水分蒸发过程是指孔隙中的水分通过蒸发面(土-气界面)逸入大气,从而使土体含水率逐渐降低而变干的过程。土体水分蒸发不同于纯水,具有非常复杂的过程,涉及到热-湿耦合条件下水分在非均质多孔介质中的迁移问题,土体中的水热传输具有交互进行、相互影响的特点,受气象、土性等多种因素的共同作用。Hillel<sup>[48]</sup>指出,土体蒸发的发生和维持须满足3个条件:(1)持续的热量供应以满足蒸发潜热消耗;(2)大气中的蒸汽压必须低于土体表面的蒸汽压,存在相对湿度差;(3)土体内部有持续的水分供应到蒸发面。Idso等<sup>[49]</sup>、唐朝生等<sup>[50]</sup>通过试验,对土中水分蒸发过程进行了初步研究,根据测得的蒸发特征曲线,将土体的蒸发过程分为3个典型阶段(见图2):(1)常速率阶段(初期恒定蒸发速率阶段);(2)减速率阶段(蒸发速率衰减阶段);(3)残余阶段(蒸发消滞阶段或滞缓阶段)。唐朝生等<sup>[50]</sup>结合土体孔隙水赋存状态、孔隙结构特征及水-土微观作用特征,对上述3个阶段的蒸发机制进行了探讨。此外,也有学者将土体水

分蒸发过程划分为两个阶段,即常速率和减速率阶段<sup>[51]</sup>。

### 4.1 常速率阶段

常速率阶段一般发生在蒸发初期,持续时间较短,蒸发速率最大,且保持恒定。在该阶段,土体的蒸发量略大于或者近似等于相同气象条件下的蒸发量,蒸发速率只受气象条件的限制,蒸发过程中剖面水分传输由毛细水渗流作用所主导。

之所以蒸发速率恒定,主要是因为此时土体的含水率相对较高,孔隙中充满了自由水,可近似地认为土体表面既是自由水面也是蒸发面(土-气界面)(见图2(a))。在此过程中,土体中自由水的蒸发占主导地位,外部环境所传递给土体的潜热能量完全用于补充自由水的水分蒸发所消耗的能量,土体的温度和大气温度处于相对平衡阶段,土体的表面始终保持饱和的蒸汽压,蒸发面和大气之间的蒸汽压梯度基本维持不变。因此,在常速率阶段,土体的蒸发速率的大小主要取决于能量供应强度即外部环境条件<sup>[52]</sup>。环境温度愈高,土体的初始蒸发速率愈大。此外,Ritchie<sup>[53]</sup>指出,风速以及空气相对湿度也会对蒸发速率产生重要影响。

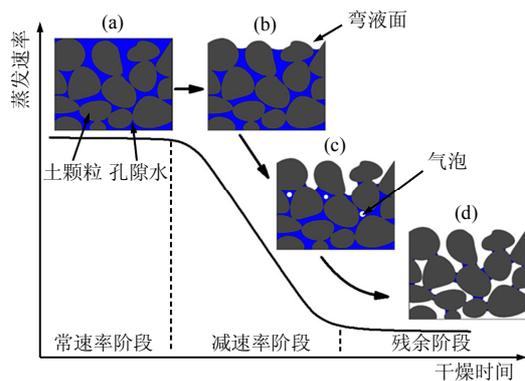


图2 土体水分蒸发过程3阶段示意图<sup>[50]</sup>  
Fig.2 Schematic showing the three stages of evaporation from soil<sup>[50]</sup>

随着蒸发的不断进行,当土体含水率减少到某一临界值之后,从下往上的毛细水传输能力减弱,无法满足蒸发力需求,则常速率阶段结束,开始进入减速率阶段。通常情况下,土体从常速率过渡到减速率阶段对应的临界含水率并不是一个恒定的常数,而是取决于土体性质以及气象条件。

#### 4.2 减速率阶段

由于蒸发作用不断消耗土体中的水分,含水率逐渐减小,对应孔隙中的自由水也愈来愈少,土体表面土颗粒间的孔隙水液面逐渐发生弯曲,并向下移动(见图2(b)),土吸力逐渐增大。吸力产生后,土体表面的蒸汽压降低,进而使土-气界面的蒸汽压梯度减小,同时对水分子的逃逸产生一定的约束作用,蒸发速率逐渐从常速率阶段过渡到减速率阶段。

减速率阶段发生在蒸发中期,土性因素尤其是含水率逐渐成为决定蒸发速率的主要因素,而气象因素则逐渐变成次要因素。一般认为,土体表层干燥硬化后,该阶段结束。目前国际上把土体蒸发速率逐渐减小的现象归因于如下几个方面:

(1) 土-气界面之间的蒸汽压梯度减小。当含水率低于临界值后,土体由饱和状态变为非饱和状态,含水率的微小变化会导致吸力的迅速增大,所对应土体表面的蒸汽压则迅速减小,从而导致蒸发面的相对湿度差减小,水分向上迁移的驱动力减弱。Wilson等<sup>[54]</sup>发现,当土体由饱和状态变为非饱和状态时,其蒸发速率随土吸力的增大而逐渐减小;

(2) 水分的迁移速率及剖面渗透系数降低。因为吸力的增加会导致土体收缩变形、孔径以及颗粒间距减小,水分传输通道受到限制;

(3) 土中水分子逸入大气所需克服的阻力逐渐增大。通常情况下,土中水有自由水与结合水两种,结合水可分为弱结合水和强结合水。在蒸发过程中

首先失去的是自由水,然后依次是弱结合水和强结合水。在土体能量供应强度或外部环境条件(蒸汽压和温度)不变的情况下,随着自由水量的减小,结合水占的比重越来越大,土体的蒸发速率必然减小;

(4) 土体剖面的水分迁移方式从原来的毛细水传输逐渐向扩散作用过渡。当土体变成非饱和之后,水-气界面将向土体深部发展,如图1(c)所示,从下层孔隙水中逃逸出来的水分子通过扩散的形式穿越上层干燥土体才能到达蒸发面,扩散速率较之前毛细水作用下的液态流要低得多。此外,孔隙水中封闭气泡的存在还会干扰剖面水分原有的迁移路径,导致水分重新分布,水分迁移到蒸发面所需时间也可能因此而延长。

由此可见,在减速率阶段,蒸发速率大小主要受剖面上水分迁移到蒸发面难易程度、渗透性、剖面吸力梯度大小、土体中可迁移水量以及水蒸气在孔隙中的扩散速率的影响。这些因素基本上取决于土体自身的水理性质和结构特征,如孔隙大小、连通性、饱和度以及水-土相互作用等<sup>[50]</sup>。

#### 4.3 残余阶段

随着蒸发的进行,当土体表面非常干燥时,土体中能供给蒸发的水分愈来愈少,毛细水作用逐渐减弱,土体孔隙水的连通性亦降低,且土体水分主要分布于局部相对微小的孔隙中,受黏土颗粒的约束作用较强。土体中的液态水已经无法直接传输至土体表面,水分的蒸发逐渐以水蒸气扩散为主导形式,蒸发过程开始从减速率阶段过渡到残余阶段(见图2(d))。水分子在孔隙中的扩散速率通常极其缓慢,尤其在前期的干燥过程中,土体上部逐渐形成一定厚度的干硬土层,孔径较小,孔隙连通性差,对水分子的向外扩散过程形成阻碍。

由图2可知,残余阶段发生在蒸发的后期,往往持续很长时间,但实际蒸发量较小。在该阶段,土体剖面上、下土层间的吸力梯度以及各处的含水率差异较小,土体结构已基本稳定。当土体内部的蒸汽压与大气蒸汽压趋于平衡时,蒸发将停滞,此时土体温度也与外界环境温度达到一致。尽管蒸发过程结束,通常在土体局部微小的孔隙中仍然会有部分水分残余,这部分水通常称之为残余含水率。残余含水率的大小一般与土质成分密切相关,在同等环境条件下,亲水性黏土矿物越多的土体残余含水率也越大。

## 5 土体水分蒸发的影响因素

由前文对土体水分蒸发过程的分析可知,土体水分蒸发的影响因素可分为两大类:一为内部因素,二为外部因素。其中,内部因素主要是指与土体自身的水理性质、结构特征及现场工程地质条件有关的因素,包括:土质成分、含水率、地下水位埋深、土体类别、孔隙大小和土壤色泽等。这些因素主要是影响土体蒸发过程中的水分输送能力。外部因素主要是指与气象有关的因素,包括:辐射、气温、地温、湿度、风速、降水及入渗方式等<sup>[50]</sup>。这些因素主要是影响土体蒸发过程中的能量供应水平。需要强调的是,土体水分的蒸发过程受内部和外部因素的共同影响,但在不同蒸发阶段,二者对蒸发的影响程度有所不同。表3简要总结了各因素对土体蒸发速率的影响情况。

表3 各因素与土体水分蒸发的相互影响关系  
Table 3 Relationships between some affecting factors and soil water evaporation behavior

影响因素	影响因素	影响因素变化趋势	蒸发速率	参考文献
内部因素	含水率	减小	减小	[54]
	饱和度	减小	减小	[54]
	黏粒含量	增加	减小	[54]
	密度	增加	减小	[54]
	渗透系数	增加	增大	[55]
	地下水位埋深	增加	减小	[56]
	含砂量	增加	增大	[54]
	粗颗粒	增加	增大	[56]
	孔径	增加	增大	[57]
	含盐量	增加	减小	[58]
	孔隙气体	增多	减小	[59]
	裂隙发育程度	增加	增加	[60]
	土体颜色	越深	越大	[61]
	外部因素	温度	增加	增大
辐射		越强	越大	[62]
相对湿度		增加	减小	[63]
风速		增加	增大	[62]
降雨入渗量		增加	减小	[61]

## 6 土体水分蒸发理论模型

蒸发是连接大气-土体相互作用的纽带,但由于土体水分蒸发的复杂性和影响因素的多样性,一直以来关于土体水分蒸发的量化都是该领域的研究热点和难点。过去相当长一段时间以来,在农业、土壤和大气科学等领域的学者结合各自学科特点,围绕自由水面或土体水分蒸发量的计算和预测开展了大量理论研究<sup>[64]</sup>,并提出了许多蒸发模型。本节着重对一些常用的或具有代表性的模型进行介绍。

### 6.1 Dalton 公式 (1802)

以水汽扩散理论为基础的 Dalton 公式<sup>[65]</sup>是最早的蒸发公式:

$$E = f(u)(e_s - e_a) \quad (1)$$

式中:  $E$  为自由水面的蒸发量,指在地下水分供给充足、无限制的情况下的水分蒸发;  $e_s$  为水面的饱和和蒸汽压;  $e_a$  为大气蒸汽压,  $f(u)$  为风函数,即:

$$f(u) = 0.35(1 + 0.15u) \quad (2)$$

式中:  $u$  为风速。对于气象因素,该公式只考虑了空气湿度差和风速,没有考虑地表环境和气压,仅适用于自由水分的蒸发量计算。尽管如此, Dalton 蒸发公式的提出使蒸发有了明确的物理意义,这为近代蒸发理论的发展奠定了基础<sup>[65]</sup>。

### 6.2 Penman 公式 (1948)

Penman<sup>[66]</sup>根据能量守恒定律,结合多个气象因素,例如空气湿度、风速、净辐射量以及温度,提出了著名的 Penman 公式:

$$E = \frac{\Gamma R_n + \eta LE_a}{\Gamma + \eta L} \quad (3)$$

式中:  $\Gamma$  为饱和蒸汽压与温度关系曲线的斜率;  $R_n$  为土体表面的净辐射量;  $\eta$  为湿度常数;  $L$  为蒸发潜热; 其中  $E_a$  为自由水面的蒸发量,可通过式(1)计算。

在 Penman 公式之后,许多学者在 Penman 公式基础上建立了其他相关的蒸发公式,如改进的 Penman 公式<sup>[8]</sup>以及 Penman-Monteith 公式<sup>[67]</sup>等,此类公式一般通过加入相关修正参数,以满足不同地区的特殊情况,而且只能用于饱和土体表面的蒸发量计算。然而,在实际蒸发过程中随着蒸发的进行土体水分的供给是有限的,土体必将进入非饱和状态,此时土体的蒸发率会逐渐降低。为此,1994年 Wilson 在 Penman 公式的基础上加入了土体表面相对湿度一项,考虑了地表土体变干时水分限制这一事实,提出了针对非饱和土表面实际蒸发量计算的 Penman-Wilson 公式<sup>[68]</sup>:

$$E = \frac{\Gamma Q + \eta E_a}{\Gamma + \eta A} \quad (4)$$

式中:  $A = 1/h_A$ ,  $h_A$  为土表面相对湿度;  $E_a$  可表示为

$$E_a = f(u)P_a(B - A) \quad (5)$$

其中,  $P_a$  为指在土体蒸发面上空气的蒸汽压;  $B = 1/$

$h_{\text{rair}}$ ,  $h_{\text{rair}}$  为空气相对湿度；其他参数含义与式 (1)、(2) 相同。

### 6.3 Fox 模型 (1968)

Fox<sup>[69]</sup>根据能量平衡原理，假设存在有一理想干土柱，并以此作为参考推导出了土体水分蒸发量的计算模型，该模型可用于土柱的蒸发量理论计算，其表达式为

$$E_d = (b_1 \Delta U + b_2 \Delta T_d) \Delta T_d \quad (6)$$

$$\Delta T_d = T_{o,\text{max}} - T_{d,\text{max}} \quad (7)$$

式中： $T_{o,\text{max}}$  以及  $T_{d,\text{max}}$  分别取理想干土柱和土体蒸发表面一天中的最高温度； $\Delta U$  为日累计风速； $b_1$ 、 $b_2$  为常数。Fox 通过式 (6) 对河岸沙地的土体水分蒸发进行了计算，所得结果与蒸渗仪所测结果之间平均误差为 13%。Ben-Asher 等<sup>[70]</sup>结合积分概念，并且把土体热通量随时间变化的温度日函数以及土体表面温度随时间变化的温度日函数引入 Fox 模型，对其进行了改进和试验验证。Evet 等<sup>[71]</sup>则在 Ben-Asher 的基础上进一步改进计算方法，提高了计算精度。Qiu 等<sup>[72]</sup>在 Fox 模型的基础上，运用数学推导代换了空气动力学阻抗，提出了一种新的计算模型，并验证了该模型的有效性。在采用 Qiu 模型计算土体蒸发量时，由于不需要考虑表面阻抗以及空气动力学阻抗等参数，且不含经验系数，因此，Qiu 模型具有简单方便、实用性强等优点，显示了良好的应用前景，但该模型在黏性土中应用较少。

### 6.4 Aydin 模型 (1998)

土体水分蒸发具有阶段性，一般认为，在蒸发的第 1 阶段土体蒸发量近似等于潜在蒸发量。Aydin 等<sup>[73]</sup>根据土体蒸发的阶段性特点，对蒸发的第 2 阶段提出如下的半理论半经验公式：

$$E_d = \frac{\lg|\psi| - \lg|\psi_{\text{ad}}|}{\lg|\psi_{\text{tp}}| - \lg|\psi_{\text{ad}}|} E_p \quad (8)$$

式中： $E_d$  为土体实际蒸发量； $\psi$  为蒸发土体表面水势； $\psi_{\text{ad}}$  为风干土体表面水势； $\psi_{\text{tp}}$  为蒸发开始进入第 2 阶段时的土体水势。 $E_p$  为土体潜在蒸发量， $E_p$  的计算表达式为

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - G) + 86.4\rho_a c_p \delta / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (9)$$

式中： $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率； $G$  为土壤热通量； $\rho_a$  为空气密度； $c_p$  为空气定压比热； $\delta$  为空气饱和水汽压与实际水汽压之差； $r_a$  为空气动力学阻抗； $\lambda$

为水汽化潜热； $\gamma$  为干湿表常数。

Aydin 模型综合考虑了土体类型、土体所处环境、土体所处地区等 3 个因素，试验验证所得测量结果与模型计算结果较为吻合。但该模型也存在局限性，即无法对土体表面水势进行精确测量。

### 6.5 Denisov 模型 (2002)

因为土体是多孔介质，考虑到土体的该特点，Denisov<sup>[74]</sup>通过多孔介质内的气体交换理论提出了土体蒸发模型为

$$E = [1 - a_1] \psi(u) \frac{\left[ 1 + \frac{\psi(u)\delta_p}{2^{\frac{3}{2}} D_p} \phi_0 \sqrt{1 - \hat{\phi}} \right] [\rho_{\text{pn}} - \rho_{\text{pv}}]}{\left[ 1 + \frac{\psi(u)\delta_p}{2^{\frac{3}{2}} D_p} \sqrt{1 - \hat{\phi}} \right] \rho_w} \quad (10)$$

式中： $a_1$  为土体的固相比； $\psi(u)$  为风函数 ( $u$  表示风速)； $\delta_p$  为土体的孔隙特征半径； $\phi_0$  为土体表层水汽饱和度； $\hat{\phi}$  为土体空气层水汽饱和度； $\rho_{\text{pn}}$  为水汽密度； $\rho_{\text{pv}}$  为参考平面处空气密度； $D_p$  为水汽扩散系数； $\rho_w$  为水的密度。因为 Denisov 模型各项参数测定过程比较复杂，且有些参数无法精确测定，因此，该模型只适合用于研究短时间内的土体水分蒸发，为其他土体水分蒸发模型作验证。

### 6.6 国内相关模型研究

国内在土体水分蒸发方面的研究起步相对较晚，但近些年也积累了不少研究成果，在提出的土体蒸发理论模型中，零通量面模型与傅抱璞模型较为成熟，现作简要分析。

#### 6.6.1 零通量面模型 (1980)

零通量面 (zero flux plane: ZFP) 是指土体剖面某深度处水分通量为 0 的面。此时土体水势梯度值在该深度处等于 0，它可以作为土体水分剖面上水分运动的参照界面，可根据水势梯度在 ZFP 面上下的变化，划分水分运动的方向，当水势梯度向上减少时，零通量面以上土层的水分为向上运动；当水势梯度向上增大时，零通量面以下土层的水分向下运动。1956 年 Richards 等<sup>[75]</sup>最早用来确定土体水分通量，1980 年英国学者 Cooper<sup>[76]</sup>对零通量面法进行了系统的总结并于 1983 年推广到中国。国内对零通量法做了大量的研究，取得了较为显著的成果<sup>[77-80]</sup>。

假如土体层中存在零通量面，这说明土体水分的蒸发消耗还没有影响到 ZFP 以下，且上部的土体

水分尚未通过 ZFP 下渗。因而只要能实测土体水势值求得 ZFP 的实际位置,并测算出 ZFP 以上的水分消耗量,就可以计算出土体水分的蒸发量。根据土体水动力学的原理可推导出计算土体蒸发的公式<sup>[80]</sup>如下:

$$E_d = \int_{z_0}^0 [\theta(z, t_1) - \theta(z, t_2)] dz \quad (11)$$

式中:  $E_d$  为土体实际蒸发量;  $z_0$  为 ZFP 位置坐标; 0 表示土体表面为坐标原点;  $\theta(z, t_1)$  为在  $t_1$  时刻从 ZFP 到土体表面的含水率分布;  $\theta(z, t_2)$  为在  $t_2$  时刻从 ZFP 到土体表面的含水率分布。

通过 ZFP 计算土体蒸发量是可行的,其关键是确定 ZFP 的存在及其位置。可以使用张力计法确定 ZFP 的位置,但此法要求仪器的性能较高,并且测量范围以及埋深要有保证,否则难以确定 ZFP 的准确位置。李宝庆等<sup>[80]</sup>通过试验研究后认为,零通量法可以有效测定土体的实际蒸发量,但其对测量的条件要求较高,否则误差较大。

#### 6.6.2 傅抱璞模型 (1981)

通过对土体蒸发过程的量纲分析以及物理研究,傅抱璞<sup>[81]</sup>推导了可用于土体水分蒸发各个阶段的普遍计算公式:

$$E_d = \frac{E_p w_t}{w_{c1} - w_f} \left[ \frac{w_{c1}}{(w_{c1}^n + w^n)^{\frac{1}{n}}} - \frac{w_f}{(w_{c2}^n + w^n)^{\frac{1}{n}}} \right] \quad (12)$$

式中:  $E_d$  为某段时间内土体实际蒸发量;  $E_p$  为土体在充分湿润情况下所能达到的最大蒸发量,即前文提到的潜在蒸发量(也常被称之为蒸发力);  $w_t$  为该时间内土体蒸发层(通常不小于 30 cm)的平均含水率;  $w_f$  为土体的凋萎系数;  $w_{c1}$ 、 $w_{c2}$  为常数,分别土体蒸发的第 1 阶段与第 2 阶段的第 1 个临界含水率,第 2 阶段与第 3 阶段的第 2 个临界含水率;  $n$  为土体特性相关参数。通过傅抱璞模型所得的计算结果与验证试验的实际观测结果比较吻合,验证试验采用的是土壤蒸发器来模拟土体水分蒸发过程,尚未进行实地验证。由于傅抱璞模型所需的参数测定难度大,且得到连续的  $w_t$  值较难,这些因素都制约了傅抱璞模型的应用推广。

综上所述,国内外在土体蒸发理论模型方面取得了丰富的研究成果,但由于自然界土体蒸发过程十分复杂,受气象条件和地质环境的双重制约,边界条件难以确定,且一些关键参数往往很难准确获取,到目前为止,已有的模型基本都存在误差大或适应范围窄等不足。此外,绝大部分模型都只考虑

了气象参数的影响,而忽略了土性及地质环境参数。

## 7 结语及展望

(1) 确定干旱气候作用下土体的蒸发量是该课题研究的核心,目前主要有理论计算和直接测量法。理论计算法包括红外遥感法、水文法和微气象学法等,归纳总结了各种方法的基本原理和优缺点;直接测量法既可基于液相技术也可基于气相技术。

(2) 开展蒸发试验是掌握土体水分蒸发过程及规律的重要途径,目前主要有室内和原位试验两种。室内试验包括蒸发皿试验、土柱试验、环境箱试验和风洞试验等。相比而言,由于环境箱试验能同时获得气象和土性参数,且运行成本低,因此,环境箱试验是一个很有前景的土体蒸发试验方法,值得推广。原位试验主要采用蒸渗仪和微型蒸发器对土体蒸发量进行直接测量,无法对环境条件进行控制。

(3) 土体水分的蒸发过程可划分为 3 个阶段:常速率、减速率和残余阶段。常速率阶段土体水分蒸发以毛细水液相传输为主,蒸发速率主要受气象环境的控制;减速率阶段土体水分蒸发受毛细水液相传输和水蒸气扩散共同作用,且逐渐过渡到蒸气扩散传输为主,蒸发速率主要受土性参数的控制;残余阶段土体水分蒸发以水蒸气扩散为主,持续时间较长,残余含水率与土质成分尤其黏土矿物含量有关。

(4) 土体水分蒸发的影响因素可分为两大类:内部和外部因素。内部因素主要是指与土体自身的水理性质、结构特征及现场地质条件有关的因素,外部因素主要是指与气象有关的因素。无论是哪个因素,均是通过影响蒸发能量供应强度或土体水分传输能力来影响蒸发过程。

(5) 在蒸发理论模型方面,国内外学者经过多年的研究,提出了一系列土体水分蒸发量计算和预测模型,极大丰富了该课题的理论研究成果。根据模型边界条件和假设条件,总结分析了一些代表性模型的优缺点和适应条件。

尽管目前国内外学者在土体水分蒸发方面已经取得了一批重要研究成果,但仍然存在一些不足,尤其是这些研究成果不是以解决岩土工程或地质工程中的干旱蒸发问题为背景,因此,难以直接应用于指导工程实践。基于此,笔者认为,本学科今后可以在以下几个方面开展重点研究,以期有新的突破。

(1) 减速率阶段的蒸发机制问题。学界普遍认为,当土体由饱和变为非饱和时,蒸发速率开始下

降,而在非饱和状态下,土体蒸发锋面向土体内部推进,孔隙中同时存在液、气两相流体,蒸发过程中剖面水分传输由毛细水渗流作用和水蒸汽的扩散作用共同控制,并逐渐由液相传输向气相传输过渡,但目前关于蒸发锋面是如何向土体内部推进的,以及水分传输方式在蒸发过程中的支配地位是如何变化的并不十分清楚。此外,关于蒸发速率与土吸力之间的相互关系也缺乏系统研究。

(2) 土性参数与蒸发速率之间的量化关系。土体水分蒸发受气象和土性参数的共同作用,但以往研究主要侧重于前者对蒸发的影响,所建立的蒸发模型也基本与气象参数相关,较少考虑土性参数,从而极大地制约了理论成果的应用,也制约了人们对土体水分蒸发机制的认知水平。

(3) 黏性土中水分的蒸发和迁移问题。目前无论是试验研究还是理论研究,一般都是以砂土为研究对象,主要是因为砂土在成分和结构上均比较简单。但黏性土尤其是膨胀土由于富含亲水性黏土矿物,孔隙水的赋存状态及孔隙结构比砂土要复杂得多,且在蒸发过程中黏性土会发生显著的收缩变形甚至开裂,蒸发问题更加突出。但到目前为止,国际上关于黏性土蒸发过程中土中水分场、吸力场、变形场的变化规律及其与水分蒸发迁移过程之间的耦合作用过程还未见系统报道。

(4) 原位土体水分蒸发量测量的精度问题。当前,对土体水分蒸发量测量的精度问题是影响该课题研究发展的重要制约因素。对于小尺度室内蒸发试验,目前的测量方法尚能满足要求,但对大尺度试样尤其是原位蒸发试验研究,现有测量方法的误差问题非常突出。开发新型的高精度的原位土体水分蒸发试验设备和监测装置应是该课题研究的重要发展方向之一。

(5) 构建通用型的土体水分蒸发理论模型。虽然国际上已存在较多的土体水分蒸发理论模型,但基本都是建立在大量假设基础之上,或要求特定的适应条件,其可靠性和准确性还需要在实际应用中进一步检验和修正。此外,一些模型往往会使用特定条件下的经验参数或者引入难以获取的参数,这也极大地限制了它们的应用和推广。因此,构建简单通用型的土体水分蒸发理论模型值得进一步深入探索。

### 参考文献

- [1] 孟春雷, 石建辉. 土壤蒸发研究及对旱灾防治的意义[J]. 防灾科技学院学报, 2007, 9(1): 83—84.
- [2] 蒋俊明. 土壤蒸发蒸散模型的研究[J]. 四川林业科技, 1995, 16(4): 20—25.
- [3] 钱学伟, 李秀珍. 陆面蒸发计算方法述评[J]. 水文, 1996, (6): 24—31.
- [4] 李家春, 姚德良, 沈卫明. 干旱地区陆面过程的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(4): 394—401.
- [5] 谢贤群. 我国北方地区农业生态系统水分运行及区域分异规律研究的内涵和研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 440—446.
- [6] 夏卫生, 刘贤赵, 雷廷武. 土壤蒸发的动力学分析[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 17—19.
- [7] SATTLER P, FREDLUND D G Use of thermal conductivity sensors to measure matric suction in the laboratory[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26: 491—498.
- [8] SILVESTRI V, SOULIE M, LAFLEUR J, et al. Foundation problems in Champlain clays during droughts. 1: Rainfall deficits in Montreal[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 7: 285—293.
- [9] 卢冰, 刘川顺, 牛飞, 等. 南阳膨胀土地区房屋开裂的原因和治理对策[J]. 土工基础, 2008, 22(5): 39—41.
- MENG Chun-lei, SHI Jian-hui. Soil evaporation research and its significance on drought prevention and cure[J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 2007, 9(1): 83—84.
- JIANG Jun-ming. Research on the evaporation and transpiration models of soil[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1995, 16(4): 20—25.
- QIAN Xue-wei, LI Xiu-zhen. The review of calculating methods for the evaporation from land surface[J]. *Hydrology*, 1996, (6): 24—31.
- LI Jia-chun, YAO De-hang, SHEN Wei-ming. Studies on terrestrial interface processes in aridarea[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1996, 11(4): 394—401.
- XIE Xian-qun. Connotation and some advances of the research on the water movement and its regional change regular in a geo-ecosystem of north China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(3): 440—446.
- XIA Wei-sheng, LIU Xian-zhao, LEI Ting-wu. Dynamical analysis on soil evaporation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(3): 17—19.
- LU Bing, LIU Chuan-shun, NIU Fei, et al. Causes and countermeasures of building cracking in Nanyang expansive soil region[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2008, 22(5): 39—41.

- [10] LLOYD-HUGHES B. The long-range predictability of European drought[D]. UK: University of London, 2002.
- [11] NELSON J D, MILLER D J. Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering[M]. [S. l.]: John Wiley, 1992.
- [12] BAHAR R, KENAI S. Analysis of some problems of foundations and retaining walls in clay soils[C]//Proceedings of International Symposium on Drought and Constructions. [S. l.]: [s. n.], 2008, 413—418.
- [13] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606—609.  
YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 606—609.
- [14] 郑少河, 姚海林, 葛修润. 裂隙性膨胀土饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 281—285.  
ZHENG Shao-he, YAO Hai-lin, GE Xiu-run. Analysis of saturated and unsaturated seepage of cracked expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.): 281—285.
- [15] YANFUL E K, MOUSAVE S M. Estimating falling rate evaporation from finite soil columns[J]. **The Science of the Total Environment**, 2003, 313: 141—152.
- [16] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 土体干燥过程中体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271—1279.  
TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-Minh, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1271—1279.
- [17] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报, 2012, (7): 1192—1200.  
TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, (7): 1192—1200.
- [18] 张茂省, 黎志恒, 孙萍萍, 等. 舟曲三眼峪 8.8 特大泥石流灾害特征与风险减缓对策[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 10—20.  
ZHANG Mao-sheng, LI Zhi-heng, SUN Ping-ping, et al. The disaster characteristics and risk mitigation measures of “8.8” debris flow at Sanyanyu Gully, Zhouqu[J]. **Northwestern Geology**, 2011, 44(3): 10—20.
- [19] 王文华, 王清, 张静, 等. 吉林省西部碳酸盐渍土基本性质试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(2): 217—224.  
WANG Wen-hua, WANG Qing, ZHANG Jing, et al. An experiment study of the fundamental property of the carbonate-saline soil in west of Jilin province[J]. **Journal of Beijing University of Technology**, 2011, 37(2): 217—224.
- [20] 程玉菲. 黑河干流中游平原作物蒸发蒸腾量时空分布研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.  
CHENG Yu-fei. Study on temporal and spatial distribution of crop evapotranspiration in plain of the main Heihe river middle reaches[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- [21] 唐登银, 程维新, 洪嘉琏. 我国蒸发研究的概况与展望[J]. 地理研究, 1984, 3(3): 84-97.  
TANG Deng-yin, CHENG Wei-xin, HONG Jia-lian. Situation and prospect of evaporation study in China[J]. **Geographical Research**, 1984, 3(3): 84-97.
- [22] 高晓飞, 杨洁, 史海珍, 等. 土壤水分蒸发测定试验方法的研究[J]. 试验技术与管理, 2009, (6): 212—214.  
GAO Xiao-fei, YANG Jie, SHI Hai-zhen, et al. Study of soil evaporation measuring experiment item[J]. **Experimental Technology and Management**, 2009, (6): 212—214.
- [23] 刘昌明. 土壤-作物-大气系统水分运动试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997.  
LIU Chang-ming. Study on water movement in soil-crop-the atmospheric system[M]. Beijing: Meteorological Press, 1997.
- [24] BROWN K W, ROSENBERG N J. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J]. **Agron. J.**, 1973, 65.
- [25] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 田间土壤水量平衡与定位通量法的应用[J]. 水利学报, 1988, (5): 1—7.  
LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil water balance of field and application oriented flux method[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1988, (5): 1—7.
- [26] 信迺谔. 计算农田蒸发的水量平衡法[J]. 干旱地区农业研究, 1986, (2): 33—39.  
XIN Nai-quan. Calculation of farmland evaporation by the water balance method[J]. **Agricultural Research in**

- the Arid Areas**, 1986, (2): 33—39.
- [27] PENMAN H L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass[C]//Proceedings of the Royal Society of London(Series A). [S. l.]: [s. n.], 1948, 193: 120—146.
- [28] MONTEITH J L. Environmental control of plant growth (LT Evants, ed.)[M]. New York: Academic Press, 1963, 95—12.
- [29] LANG A R G. Inequality of eddy transfer coefficients for vertical transport of sensible and latent heats during adjective inversion[J]. **Boundary Layer Meteor**, 1983, (25): 25—41.
- [30] THORNTHWAITE C W, HOLZMAN B. The determination of evaporation from land and water surfaces[J]. **Mon. Weath. Rev**, 1939, 67.
- [31] 信迺论. 土壤蒸发观测方法的研究[J]. 土壤学报, 1962, 10(4): 388—400.  
XIN Nai-quan. Study on soil evaporation observation method[J]. **Acta Pedologica Sinica**, 1962, 10(4): 388—400.
- [32] 宋卫康, 丁文其. 土体水分蒸发试验装置研究进展[J]. 路基工程, 2013, (5): 1—4.  
SONG Wei-kang, DING Wen-qi. Research progress on test apparatus for water evaporation from soil[J]. **Subgrade Engineering**, 2013, (5): 1—4.
- [33] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A parameterization of evaporation of from bare soil surfaces[J]. **Journal of Applied Meteorology**, 1990, 29(5): 385—389.
- [34] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A model and experimental study of evaporation from bare-soil surface[J]. **Journal of Applied Meteorology**, 1992, 3(3): 304—312.
- [35] WILSON G W, FREDLUM D G, BARBOUR S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(2): 151—161.
- [36] SMITS K M, CIHAN A, SAKAKI T, et al. Evaporation from soils under thermal boundary condition: Experimental and modeling investigation to compare equilibrium and nonequilibrium-based approaches[J]. **Water Resources Research**, 2011, 47: W05540.
- [37] MOHAMED A A, SASAKI T, WATANABE K. Solute transport through unsaturated soil due to evapo-ration[J]. **Journal of Environmental Engineering**, 2000, 126(9): 842—848.
- [38] CUI Y J, TA A N, HEMMATI S, et al. Experimental and numerical investigation of soil-atmosphere interaction[J]. **Engineering Geology**, 2013, 165(15): 20—28.
- [39] 王文正. 裸土水分蒸发之风洞试验[D]. 中国台湾: 台湾国立中央大学, 2006.  
WANG Wen-zheng. Wind tunnel test of bare soil evaporation[D]. Taiwan, China: Taiwan National Centre College, 2006.
- [40] YAMANKA T, TAKEDA A, SUGITA F. A modified surface-resistance approach for representing bare-soil evaporation: Wind tunnel experiments under various atmospheric condition[J]. **Water Resources Research**, 1997, 33(9): 2117—2128.
- [41] 葛凡, 王钊. 蒸渗仪及其研究现状[J]. 节水灌溉, 2004, (2): 30—32.  
GE Fan, WANG Zhao. Lysimeter and its application status[J]. **Water Saving Irrigation**, 2004, (2): 30—32.
- [42] BOAST C W, ROBERTSON T M. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation[J]. **Soil Science Society of American Journal**, 1982, (46): 689—696.
- [43] 王会肖. 砂土土壤蒸发的测定与模拟[J]. 中国农业气象, 1997, 18(4): 29—35.  
WANG Hui-xiao. Measurement and simulation of evaporation from a bare sand soil[J]. **Agricultural Meteorology**, 1997, 18(4): 29—35.
- [44] 李王成, 王为, 冯绍元, 等. 不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 6—13.  
LI Wang-cheng, WANG Wei, FENG Shao-yuan, et al. Field experimental study on the measurement of soil evaporation using different types of micro-lysimeters[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2007, 23(10): 6—13.
- [45] KLOCKE N L, MARTIN D L, TODD R W, et al. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies[J]. **Trans ASAE**, 1990, 33: 1590—1596.
- [46] EVETT S R, WARRICK A W, MATTHIAS A D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation[J]. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 1995, 59(2): 329—336.
- [47] TODD R W, EVETT S R, HOWELL T A, et al. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily[J]. **Soil Sci. Soc. Am. J.**

- 2000, 165(11): 890—895.
- [48] HILLEL D. Introduction to soil physical[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [49] IDSO R J, REGINATO R D, JACKSON R D, et al. The three stages of drying of a field soil[J]. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 1974, 38: 831.
- [50] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, (6): 875—881.  
TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, (6): 875—881.
- [51] RITCHIE J T, BURNETT E. Dry land evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences[J]. **Agronomy Journal**, 1971, 63: 56—61
- [52] VAN BRAKEL J. Advances in drying[J]. **Mass Transfer in Convective Drying**, 1980, 1: 217.
- [53] RITCHIE J T. Model for predicting evaporation from a crop with incomplete cover[J]. **Water Resource and Research**, 1972, 8(5): 1204—1213.
- [54] WILSON G W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surface[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34: 145—155.
- [55] WILSON G W, FREDLUND D G, BARTOUR S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(2): 151—161.
- [56] DIAZ F, JIMENEZ C C, TEJEDOR M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation[J]. **Agricultural Water Management**, 2005, 74: 47—55.
- [57] FISHER R A. Some factors affecting the evaporation of water from soil[J]. **Journal of Agricultural Science**, 1923, 13: 121—143.
- [58] KAYYAL M K. Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soil[C]//Proceedings of First International Conference on Unsaturated Soils. [S. l.]: [s. n.], 1995, 373—379.
- [59] OLIVER T R, NEWITT D M. The measurement of suction potentials and moisture distribution in drying granular soils[J]. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, 1949, 27: 9—18.
- [60] HILLEL D. Introduction to environmental soil physics[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- [61] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003, 2.  
WANG Zheng-you. Analysis of factors affecting soil moisture evaporation[J]. **Shanxi Water Resources**, 2003, 2.
- [62] GILLILAND E R. Fundamental of drying and air conditioning[J]. **Ind. Eng. Chem.**, 1936, 30: 506—514.
- [63] RODRIGUEZ R, SANCHEZ M, LDESMA A, et al. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44: 644—658.
- [64] 李红星. 土壤蒸发数学模型的建立及试验验证[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.  
LI Hong-xing. Model for soil evaporation and experimental verification[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008.
- [65] GRAY D M. Handbook on the principles of hydrology[M]. Ottawa: Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, National Research Council of Canada, 1970.
- [66] PENMAN H L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass[J]. **Proceedings of the Royal Society of London(Series A)**, 1948, 193: 120—146.
- [67] MONTEITH J L. Environmental control of plant growth(LT Evants, ed.)(M). New York: Academic Press, 1963.
- [68] WILSON G W, FREDLUND D G. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31(2): 151—161.
- [69] FOX M J. A technique to determine evaporation from dry stream beds[J]. **Journal of Applied Meteorology**, 1968, 8: 697—701.
- [70] BEN-ASHER A D, WARRICK A W. Assessment of evaporation from bare soil by infrared thermometry[J]. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 1983, 47: 185—191.
- [71] EVETT S R, MATTHIAS A D, WARRICK A W. Energy balance model of spatially variable evaporation from bare soil[J]. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 1994, 58: 1—10.
- [72] QIU G Y, YANO T, MOMII K. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil surface[J]. **Journal of Hydrology**, 1998, 210: 93—105.