

文章编号: 1007-4929(2007)03-0022-04

土壤中水、热、盐耦合运移机理与模型的研究进展

万良兴, 田军仓, 郑艳艳, 李全东

(宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 土壤水、热、盐运移规律的研究是目前土壤学、农田灌溉、水土保持、环境科学等学科研究的一个热点问题,也是防治土壤次生盐碱化,提高土壤肥力和土壤生产效率的重点。为此,简要介绍了土壤水、热、盐运移基本理论的发展过程和国内外学者数十年来关于土壤水、热、盐的研究成果,并对土壤水、热、盐运移模型研究进行了一定的评价,讨论了目前该研究领域急需解决的问题,为进一步的研究提供帮助。

关键词: 土壤; 盐渍化; 水、热、盐运移; 模型

中图分类号: 152.7 文献标识码: A

Advance of Research on Theory and Model of Coupling Transportation of Water, Heat and Salt in Soil WAN Liang-xing, TIAN Jun-cang, ZHENG Yan-yan, LI Quan-dong

(College of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxing University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The research on the coupling transportation of water, heat and salt is a hot topic for some subjects research, such as soil science, farmland irrigation, conservation of water and soil, environmental science. It is also key content of research on preventing and controlling secondary Salinization of soil, enhancing soil fertility and soil production efficiency. Therefore, this paper briefly introduced the developing process of basic theory of transportation of soil water, heat and salt in soil, and certain research achievements of the domestic and foreign scholars about this topic in past years. Then, certain appraisal was made on the model of transportation of water, heat and salt in soil. Moreover, the urgent issues that need to be solved in this territory were discussed to provide help for the further study.

Key words: soil; Salinization; transport of soil water and temperature and salt; model

土壤盐渍化是一个世界性的问题,盐渍化的防治和盐渍土的改良是这一问题的核心。要解决这一核心问题,土壤水、热、盐运移机理的研究就显得尤为重要,它既是研究盐渍土发生和改良利用的理论基础,也是干旱半干旱地区农业和生态环境保护的主要依据。在灌溉区,由于管理粗放,灌水方法不当等原因,土壤盐渍化面积正以每年 100 万 hm^2 的速度发展。土壤中过多的盐分不仅引起土壤盐碱化,而且还可能发展成为广泛的水土环境问题。随着人口增加和土地资源的减少,提高现有土地生产能力,改良与开发利用盐渍土,已成为实现土地资源可持续利用和农业可持续发展的一个重要内容。

土壤中盐分的运动遵从“盐随水来又随水去”^[1]的规律。

在干旱、半干旱地区强烈蒸发条件下,土壤盐分或地下水可溶性盐类通过水的垂直或侧向运动向地表累积,这是土壤积盐过程最为普遍的形式,也是发生盐渍化的主要原因。所以,土壤中水、热、盐耦合运移机理和模型的研究,对盐渍土的改良、促进农业的可持续发展、保护生态环境等方面都有重要的指导意义。

1 土壤水、热、盐耦合运移机理研究

1.1 土壤水热耦合运移机理研究

Philip 等(1957 年)提出了描述土壤水热耦合运移的理论^[2],对土壤水热耦合运移的数值模型研究也是同一时期在等温水分运动模型的基础上发展起来的。Milly 等(1982 年,1984

收稿日期: 2006-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376015)。

作者简介: 万良兴(1978-),男,硕士研究生。

年)在对土壤中水热交换的数值模拟时采用并发展了这种理论^[3~4], Horton 于 1989 年提出了有植物冠层影响的土壤水热耦合二维数学模型。国内土壤水热耦合数值模型的研究起步于 20 世纪 80 年代, 林家鼎(1983 年)^[5]对无植被土壤内水分流动、温度分布及土壤表面的蒸发效应进行研究, 旨在给出计算土壤水分、温度变化的物理模型和计算方法; 蔡树英(1994 年)^[6]用室内蒸发试验验证土壤水、汽、热运动的耦合性数值模型, 认为与等温模型相比, 耦合模型更确切地反映温度变化条件下的土壤水热运动规律; 隋红建(1991 年)^[7]、康绍忠(1993 年)^[8]、孙景生(1995 年)^[9]、郭庆荣(1997 年)^[10]分别对不同覆盖条件下的田间水热运移进行了数值模拟研究, 实现不同覆盖层下非均质土壤水热分布的定量分析, 并辅以田间试验验证; 王同科、孙景生(1997 年)^[11]给出了 SPAC 系统中水热耦合运移方程的有限元算法, 该算法将水热方程离散为一个块三对角代数方程组, 使得水热参数同时被求出。任理等(1998 年)^[12]将不同覆盖下田间水热动态的一维模型发展到二维水热迁移的数值模型, 有力地促进了我国土壤水热耦合运移研究的进一步深化; 吴从林等(2000 年)^[13]在大田水热传输方面做了大量的系统研究, 在此基础上建立了地膜覆盖条件下 SPAC 系统水热耦合运移模型, 该模型由大气、植物冠层、地膜覆盖层和土壤四层组成。根据能量平衡原理建立了各层的能量平衡方程, 采用牛顿-莱普森方法和有限差分法求解了各能量平衡方程和土壤水分及温度剖面, 并用冬小麦的实测资料对模型进行了验证, 结果表明模型具有一定的精度, 此外, 还对 SPAC 系统中的阻力项进行了探讨。丛振涛等(2004 年, 2005 年)^[14~15]开展了冬小麦生长与 SPAC 水热运移的耦合研究, 并建立了可以同时动态模拟冬小麦生长过程与 SPAC 水热运移过程的动力学模型—WheatSPAC 模型。通过对冬小麦叶面积指数、株高、根系分布的模拟, 实现冬小麦生长与 SPAC 水热运移的耦合。

1.2 土壤水盐耦合运移机理研究

对于地下水埋深较浅的地区, 土壤盐碱化问题尤其严重, 在很大程度上限制了土地生产力的提高和农业的可持续发展。因此, 各国对土壤中的水盐关系深入系统的研究由来已久。

农田土壤水盐运动理论最早起源于 Darcy 定律, 而固体热传导方程的问世为土壤溶质运移提供了依据^[16]。自从 Buckingham(1907 年)^[17]把能量概念引入土壤水, Richards(1931 年)^[18]用偏微分方程描述非饱和土壤水的运行, 建立了多孔介质中水流运动的基本方程, 才开始了土壤水分的定量研究。由于盐分运移与土壤水分运移同时发生, 因此, 土壤溶质运移方程也是随着土壤水分方程而发展起来的^[19]。这些方程的共同点在于都是用动力学观点、物质与能量守恒原理来分析土壤水盐运动。

最初的研究以等温条件为假设前提, 且多数只考虑水分的重力势和基质势、盐分的对流和弥散作用, 而较少涉及水盐之间的其他相互作用, 如盐分浓度梯度对水分运移的影响, 实际上, 盐分浓度对土壤水分运动有着重要的作用。在非饱和土壤中, 特别是重粘土, 土壤的渗透势是土壤水分运动的重要驱动力。许多实验和模拟结果表明, 土壤持水能力极大地受到土壤温度的影响, 水表面张力的温度效应是造成这种影响的主要原

因之一。在土壤水分运动的数学模拟中, 若忽略土壤水力性质的温度效应会产生较大的预测误差。因此, 自 20 世纪 50 年代以来, 非等温条件下的土壤水分运动方程开始受到重视和发展, 其中主要是从土壤水力性质的温度效应入手。土壤水盐关系的早期研究, 主要着重于弥散即可溶性置换的研究, 探讨了在土壤不发生化学反应的情况下弥散张量与孔隙水流速之间的相互关系。

20 世纪 70 年代中后期, 水盐运动的机理研究开始注重田间复杂的实际情况, 如对结构良好土壤的水盐运动方式不仅考虑对流和弥散, 还考虑了其中的可动水体和不动水体、大孔隙流、优先流和通管流等, 并建立了土壤水盐运移的两区—两域模型^[16, 20]。在两区模型中, Van Genuchten 视溶质在可动水与不动水两孔隙中, 且还在两个区域间相互运移, 考虑了可动水、不动水区的作用及相互影响, 更为切合实际。它可以用来描述盐分在砂土柱的运移, 以及存在吸附情况下的溶质在壤土中的运移。

在过去几年里, 人们进行了大量室内一维、二维饱和、非饱和和水盐运移实验, 提出了各种描述土壤水盐运移的数学模型, 但是由于室内条件的局限性, 实际应用受到很大的限制。因为实际农田水分、盐分状况受降水、灌溉、地下水埋深等上、下边界条件, 以及农作物生长等诸多因素的影响, 其中土壤水分状况、土壤盐分状况和农作物生长状况三者密切相关, 再加上农田条件下溶质运移的实验数据较少, 所以对于农田条件下土壤非饱和水分和盐分运动的机理和特征, 至今尚未完全了解。由于土壤以及土壤水分和盐分的空间变异性, 野外实验需系统观测大量数据, 实验过程复杂, 建立适合于农田土壤水盐运移特征的动态模型仍是以后土壤水盐运移研究的重点问题。

土壤在形成和发展过程中, 受多种因素的影响, 土壤的孔隙结构在空间上分布极不均匀, 土壤结构空间变异性导致了土壤含水量和含盐量在空间上的变化。Melsen 于 1985 年引入土壤空间变异理论, 提出了如何确定土壤参数平均值, 方差及其相关尺度的理论和方法^[21]。后来, 许多学者建立随机对流弥散模型的随机对数对流传递模型, 求得溶质运移速度概率分布函数, 平均浓度分布。这种模型适用于野外非饱和土壤溶质运移的研究, 有较好的结果, 但是缺乏实测资料验证, 还需进一步完善改进。

在蒸发条件下的水盐运移规律方面, 国内外研究者做了大量工作。已有研究表明, 地膜覆盖有增温、保墒、节水、抑盐的作用。通过对覆膜条件下农田土壤水盐运移的研究, 旨在能对田间观测、盐碱地开发和改良以及膜孔灌溉技术提供理论依据和技术指导。但目前还很少涉及蒸发的土表覆膜开孔率对水盐运动影响方面的内容^[22]。

随着土壤水盐运动机理研究的逐渐深入, 并根据土壤、环境、研究目的和溶质迁移理论的不同, 各种定量描述土壤水盐运动的模拟模型纷纷建立起来, 以研究区域尺度分类, 可概括为土壤水盐运移模型、田间水盐运移模型以及区域水盐运移模型。

总之, 由于土壤的空间变异特性, 土壤中溶质运移受到多种物理机制的支配, 且土壤物理化学参数均是时间与空间的随机变量, 从而使土壤中水盐运移成为一个十分复杂的过程。因

此,国内外学者对土壤水盐运移模型的研究从宏观发展到微观,又逐渐发展到随机模型,为在土壤溶质领域内的研究打下坚实的理论基础。

随着计算技术的飞速发展,人们开始了更为复杂的田间土壤水盐运移的研究。目前,田间模拟的计算结果与实际观测结果还有一定的差距,对非饱和和流土壤水盐运动的模拟结果更是如此,包括盐分运移中对物理化学过程变化的研究在内,还有很长的路要走。其原因是由于土壤的物理性质在空间上的不均匀性、土壤水盐运动过程的复杂性及输入水盐系统各变量的随机性。不久的将来,对土壤水盐运移机理的研究,一定能达到指导生产实践的目的。

1.3 土壤水、热、盐耦合运移机理研究

由于土壤中水、热、盐耦合运移的情况比较复杂,综合研究土壤中水、热、盐耦合运移规律的还不多。随着对土壤中水、热、溶质运移规律研究的不断深入,国内外学者纷纷从不同角度对土壤中水、热、盐耦合运移问题进行了局部的机理探讨及试验研究。主要有:Nassar等(1992年)^[23]对一维水、热、盐运移进行了模拟,计算模型包括水分梯度、温度梯度、溶质梯度作用下的水汽输送、热量传递和溶质运移,并在封闭土柱中进行了验证和分析;胡和平(1992年)^[24]、黄兴法(1993年)^[25]、岳汉森(1994年)^[26]分别分析了冻结条件下非饱和土壤水、热、盐耦合的运动,建立了相应的数学模型,并讨论了分布的一般规律;Noborio于1996年对二维水、热、盐进行了动态模拟^[27];李伟强等(2000年)^[28]对水泥硬壳覆盖条件下水、热、盐运移及其对枣树生长发育和根分布的影响进行了研究,发现水泥硬壳覆盖可以抑制土壤水分蒸发,降低土壤最高温度,使表层土壤脱盐率达22.2%;李春友等(2000年)^[27]分别从等温和非等温水、热、盐动态模拟以及覆盖边界层3个方面,以秸秆覆盖条件下土壤水、热、盐耦合运动规律模拟研究为重点,介绍了20世纪50年代以来土壤水、热、盐数学模拟的研究成果,并简要论述了有关模型的特点及今后的发展方向;叶乐安等(2002年)^[29]概括了国内外土壤水热耦合运移、土壤水和溶质耦合运移及土壤水、热和溶质耦合运移研究的基本理论和代表性成果,并在此基础上,探讨了土壤水、热和溶质运移耦合系统需要进一步研究的问题。

2 土壤水、热、盐耦合运移模型研究

在土壤水、热、溶质耦合运移模拟的研究中,经历了很长的发展阶段,总结了很多有效的模型,可归纳为:机理性模型,物理模拟模型及数学模拟模型等3大类^[30]。数学模型又可分为确定性模型,随机统计模型和传递函数模型(TFM)。随着土壤中水、热、溶质运移理论的发展和计算手段的不断完善,在研究中较多的采用数学方法。目前,模拟土壤溶质运移的两类计算方法是基于对流-弥散方程的确定性方法和基于传递函数模型的随机方法。确定性数学模型由基本的对流-弥散方程及其辅助方程构成,该类模型可较好地提示溶质在均质多孔介质中的运移机理及时间、空间对溶质运移的影响。对流弥散模型是描述溶质运移的经典数学模型,其中针对一维饱和流条件下对流-弥散方程研究得最多。目前,国内外广泛采用这类模型

对土壤水盐运移进行数值模拟。

因为土壤中水、热、溶质运移机理的试验研究相当复杂,我国在20世纪80年代初期才开始了本领域有关方面的研究工作;杨金忠(1986年)等对土壤中溶质运移理论及计算方法进行了较为详细的研究;张瑜芳(1991年)、康绍忠(1993年)等对土壤水分及热状况进行了研究等。

通过土壤中水、热、盐运动方程(即Darcy, Fourier及Fick定律)和连续方程,Nassar于1991年提出了描述非恒定条件下水、热、盐运动的控制方程,其中包括水分、热运动和溶质运移3个子方程:

水分运动方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (D_{\theta} \nabla \theta_L) - \nabla \cdot (D_C \nabla C) + \nabla \cdot K$$

热运动方程:

$$\begin{aligned} & [C_V + L(S - \theta_L)h_r\beta] \frac{\partial T}{\partial t} + \\ & \left[L(S - \theta_L)\rho_0 h_r \frac{Mg}{RT} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_L} - L\rho_0 h_r + \rho_L g(\psi - T \frac{\partial \psi}{\partial T}) \right] \frac{\partial \theta_L}{\partial t} - \\ & [L(S - \theta_L)\rho_0 h_r Mv\varphi] \frac{\partial C}{\partial t} = \\ & \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L\rho_L [\nabla \cdot (D \nabla \theta_L) - \nabla \cdot (D_{CV} \nabla \theta_L)] + \\ & C_L \rho_L [D_{\theta} \nabla \theta_L + D_{TL} \nabla T - D_{CL} \nabla C + Kk] \nabla T \end{aligned}$$

溶质运移方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C\theta_L)}{\partial t} = \\ & \nabla \cdot (D_s \nabla C) + \nabla \cdot (D_{Tm} \nabla T) - \nabla \cdot (D_{siev} \nabla \theta_L) - \nabla \cdot (\bar{V}\theta_L C) \end{aligned}$$

式中: θ 为土壤液态水体积含量 θ_L 和气态水体积含量 θ_V 之和; C 为溶质浓度; T 为温度; t 为时间。

土壤水分运动方程包括汽相及液相两部分;热运动方程包括潜热、湿热在内的对流与传导;溶质耦合运移方程考虑了液态水运动以及分子扩散、水动力弥散、盐筛作用和温度梯度的影响。在上述方程的基础之上,各国学者建立了大量的特定条件下土壤水、热和溶质运移模型。

3 结 语

土壤中水、热、盐耦合运移机理与模型的研究相当复杂,我国在本领域的研究工作起步较晚,20世纪80年代初期才开始有关方面的研究工作。纵观国内外研究,还有许多问题亟待解决。

(1)水、热、盐耦合运移模型的模拟有了很大发展,且根据不同的研究目的,建立了众多的模拟土壤溶质运移的模型,这些模型的建立对人们解决土壤盐渍化及水土环境问题起到了重要作用。然而,现有模型的研究也存在很多不足,如,参数众多,用于大田条件时可操作性差,而且所建模型的数值方法缺乏统一和标准化,可重复性差,众多的模型除建立者自己进行验证外,很少被他人直接应用到类似问题上,模型的应用性受到了限制。

(2)大部分数学模型是从动力学角度推求的,其理论及试验结果可能仅适用于某质点的状况。由于土壤结构的时空变异特性,将统计、随机和确定性模型以及物理模型等模型相结合,可能是解决这一问题的一个突破口。

(3)将水、热、盐藕合运移理论与 RS、GIS 技术相结合,研究地下水埋深与土壤水、热、盐耦合运移状况,包括地下水临界深度和土壤溶液浓度变化特点等问题,更是一个全新的研究课题。

(4)目前,在土壤水、热、盐耦合运移规律的研究中,对土壤水盐或水热单方面结合的研究比较多,而对农田土壤水、热、盐运移规律三者之间相互关系和相互作用的研究不多,尤其对农田土壤盐热二者之间的研究甚少,所以应进一步加强和完善这几方面的机理性研究。

参考文献:

- [1] 马兴旺,钟新才.宽膜覆盖下土壤环境研究 I:土壤盐分运移分布特点[J].土壤通报,2001,32:128-130.
- [2] Philip J R, Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1957,38:222-231.
- [3] Milly C P D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model[J]. Water Resources Res., 1982, 18(3): 489-498.
- [4] Milly C P D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. Water Resources Res., 1984, 20(8): 1087-1098.
- [5] 林家鼎,孙菽芬.土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究——土壤表面蒸发阻抗的探讨[J].水利学报,1983,(7):1-8.
- [6] 蔡树英,张瑜芳.温度影响下土壤水分蒸发的数值分析[J].水利学报,1992,(11):1-8.
- [7] 隋红建,曾德超,陈发祖.不同覆盖条件对土壤水热分布影响的计算机模拟 I—数学模型[J].地理学报,1992,47(1):74-79.
- [8] 康绍忠,刘晓明,张国瑜.作物覆盖条件下的水热运移的模拟研究[J].水利学报,1993,(3):11-17.
- [9] 孙景生,陈玉民,康绍忠,等.夏玉米田水热耦合运移的数值模拟[J].灌溉排水,1995,14(3):24-29.
- [10] 郭庆荣,李玉山.非恒温条件下土壤中水热耦合运移过程的数学模拟[J].中国农业大学学报,1997,12(增刊):33-38.
- [11] 王同科,孙景生.SPAC系统中水热耦合运移方程的有限元迭代算法[J].水利学报,1997,(3):65-68.
- [12] 任理,张瑜芳,沈荣开.条带覆盖下土壤水热动态的田间试验与模型建立[J].水利学报,1998,(2):1-9.

(上接第 21 页)

参考文献:

- [1] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. Agricultural Water Management, 1990, (17):215-231.
- [2] Waddington S R, Palmer A F E, Edge O T. Research methods for cereal/legume intercropping[M]. Mexico, CIMMYT, 1989.
- [3] 卢良恕.中国立体农业概论[M].成都:四川科学技术出版社,1999.
- [4] Fukai S. Intercropping—bases of productivity [J]. Field Crops Research, 1993, (34):239-245.
- [5] Baumann D T, Bastiaans L, Goudriaan J, van Laar H H, Kropff M J. Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition [J]. Agricultural Systems, 2002,(73):173-203.
- [6] 王广兴,刘祖贵,吴海卿.花生玉米间套种植的节水增收效益[J].灌溉排水,1998,17(3)42-45.

- [13] 吴从林,黄介生,沈荣开.地膜覆盖条件下 SPAC 系统水热耦合运移模型的研究[J].水利学报,2000,(11):89-96.
- [14] 丛振涛,雷志栋,胡和平,等.冬小麦生长与土壤—植物—大气连续体水热运移的耦合研究 II:模型验证与应用[J].水利学报,200536(6):741-745.
- [15] 丛振涛,雷志栋,胡和平,等.冬小麦生长与土壤—植物—大气连续体水热运移的耦合研究 I:模型[J].水利学报,2005,36(5):575-579.
- [16] 李韵珠,李保国.土壤溶质运移[M].北京:科学出版社,1998.
- [17] Buckingham. Studies on the movement of soil water, Bull. 38,61 pp., U. S. Dep. Of Agric., Washington, D. C., 1907.
- [18] Richards, L. A. Capillary conduction of liquids in porous mediums[J]. Physic, 1931,1, 318-333.
- [19] 黄领梅,沈冰.水盐运动研究述评[J].西北水资源与水工程,2000,11(1):6-12.
- [20] 徐力刚,杨劲松.农田土壤中水盐运移理论与模型的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(3):254-258.
- [21] 杨金玲,文启凯,田长彦,等.土壤空间变异研究现状与展望[J].干旱区研究,2001,18(2):50-55.
- [22] 李毅,王全九,王文焰,等.覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究[J].植物营养与肥料学报,2005,11(2):187-193.
- [23] Nassar I N, Robert Horton. Water Transport in unsaturated noniso-thermal salty soil: I. Experimental results[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989,53:1323-1329.
- [24] 胡和平,雷志栋,杨诗秀.土壤冻结时水热迁移规律的数值模拟[J].水利学报,1992,(7):1-8.
- [25] 黄兴法,曾德超.冻结期土壤水盐热运动规律的数值模拟[J].北京农业工程大学学报,1993,13(3):43-50.
- [26] 岳汉森.土壤在冻融过程中水—热—盐耦合运移数学模型之初探[J].冰川冻土,1994,16(4):308-311.
- [27] 李春友,任理,李保国.秸秆覆盖条件下土壤水热盐耦合运动规律模拟研究进展[J].水科学进展,2000,11(3):325-332.
- [28] 李伟强等.水泥硬壳覆盖条件下水热盐运移及其对枣树生长的影响[J].生态农业研究,2000,8(3):51-54.
- [29] 叶乐安,刘春平,邵明安.土壤水、热和溶质耦合运移研究进展[J].湖南师范大学自然科学学报,2002,25(2):88-92.
- [30] 李法虎.土壤中水、热、溶质运移的研究现状及展望[J].灌溉排水,94, 13(1): 7-9.

- [7] 毛树春,韩迎春,宋美珍,等.套作棉花共生期需水规律研究[J].棉花学报,2003,15(3):155-158.
- [8] 王仰仁,张建中,王丽霞.作物组合种植需水量与灌溉制度研究[J].中国农村水利水电,2000, 11: 9-11.
- [9] 王仰仁,王丽霞.作物组合种植的需水量研究[J].灌溉排水,2000,19(4): 64-67.
- [10] 王仰仁,李明思,康绍忠.立体种植条件下作物需水规律研究[J].水利学报,2003,(7): 90-95.
- [11] 高阳.冬小麦—春玉米间作条件下作物需水规律研究[D].北京:中国农业科学院,2005.
- [12] 高阳,段爱旺.冬小麦间作方式下棵间蒸发规律试验研究[J].灌溉排水学报,2005,24(2):13-17.
- [13] 高阳,段爱旺.冬小麦间作春玉米土壤温度时空变化特征试验研究[J].中国农村水利水电,2006,(1):1-3.