

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.16.0027



两种土壤含水量与水势关系

吴沿友^{1 2 3}, 胡林生^{1 2}, 谷睿智^{1 2}, 吴沿胜^{1 2}, 黎明鸿^{1 2}

(1. 江苏大学农业装备工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏 镇江 212013; 3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室环境生物科学与技术研究中心, 贵州 贵阳 550002)



吴沿友

摘要: 研究了2种土壤的水分特征曲线以及不同土壤水分随时间的变化规律. 依据吉布斯自由能公式, 可以导出土壤水分特征曲线模型; 以壤土和壤质黏土为研究对象, 设置4个水分水平, 监测了连续干旱下土壤水势和时间的关系, 运用 Logistic 方程对两者之间的关系进行拟合. 结果表明: 依据吉布斯自由能公式导出的土壤水势和含水量的关系模型精确性很高; Logistic 方程能很好地拟合土壤水势随时间的变化关系; 由土壤水势推算的土壤含水量随时间的变化关系也可用 Logistic 方程很好地拟合. 壤质黏土的田间持水量比壤土高出 11.6%, 壤土的含水量下降到凋萎含水量的时间较壤质黏土要晚, 说明了壤土保持作物可利用的水分能力要高于壤质黏土. 研究结果可为作物的需水信息提供技术支持.

关键词: 土壤; 土壤水势; 含水量; 模型; Logistic 方程

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)04-0351-06

吴沿友, 胡林生, 谷睿智, 等. 两种土壤含水量与水势关系[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(4): 351-356.

WU Yanyou, HU Linsheng, GU Ruizhi, et al. Relationship between soil water potential and water content of two soils[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017, 35(4): 351-356. (in Chinese)

Relationship between soil water potential and water content of two soils

WU Yanyou^{1 2 3}, HU Linsheng^{1 2}, GU Ruizhi^{1 2}, WU Yansheng^{1 2}, LI Minghong^{1 2}

(1. Institute of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. Research Center for Environmental Bio-Science and Technology, State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: Soil moisture characteristic curves of the two species of soils were researched. Based on the Gibbs free energy, the model of soil water potential and water content was found. As loam and loam clay were two common soils, the relationship between soil water potential and moisture losing time with four soil water levels was monitored, and Logistic equation was used to fit the relationship between soil water potential and water content. The results show that the established model based on Gibbs free energy was quite feasible since the relationship between soil water potential and moisture losing time can be well fitted by Logistic equation. The relationship between water content (calculated by the model of soil water potential and water content) and moisture losing time can be well fitted with Logistic equation. The field water capacity of loam clay was 11.6% higher than that of the loam. However, the time

收稿日期: 2016-01-28; 网络出版时间: 2017-04-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170401.1017.024.html>

基金项目: 江苏高校优秀学科建设工程资助项目

作者简介: 吴沿友(1966—),男,安徽贵池人,研究员,博士生导师(yanyouwu@ujs.edu.cn),主要从事农业水土工程研究。
胡林生(1988—),男,河南中牟人,硕士研究生(hls879@163.com),主要从事农业灌溉研究。

point when water content of loam decreased to wilting moisture was later than that of the loam clay, which indicated that the water-holding capacity of the loam was obviously higher than that of the loam clay. This research could provide the real-time irrigation technical support for the information of crop water demand.

Key words: soil; soil water potential; water content; model; Logistic equation

土壤含水量是影响作物生长的重要因素,研究土壤水分特征曲线对指导农业灌溉有很大意义,因为土壤含水量的高低对土壤水势的大小有重要影响^[1].土壤含水量不仅影响植物对水分的吸收,同时也会影响作物对养分的利用^[2-4].

土壤水分特征曲线是表示土壤水非饱和状态下土壤水的能态与数量之间的曲线.通过土壤水分特征曲线可以定性地分析土壤含水量与土壤水势之间的关系,为农业节水灌溉提供需水信息.目前,应用较广泛的土壤水分特征曲线模型主要有 Van Genuchten 模型、Brooks - Corey 模型、Gardner 模型^[5-8].这些模型精确度较高,需要确定进气吸力、饱和导水率、空隙弯曲度、饱和含水量和滞留含水量等参数,且 Brooks - Corey 模型、Gardner 模型适用的土壤质地范围较小.以上模型需要确定一系列参数,例如:SHAO 等^[9]曾利用积分法来确定 Van Genuchten 模型的参数;也有学者通过土壤水分运动过程反推 Brooks - Corey 模型参数^[10];而刘继龙等^[11]研究了多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数.因为以上模型参数的确定较为复杂,制约了土壤水分特征曲线在农业灌溉中的推广,所以如何简洁快速地获取土壤水分特征曲线对指导农田灌溉具有重要意义.

目前,土壤含水量的监测方法有张力计法、时域反射法、中子法、烘干法、土壤电阻法等^[12-15].烘干法是精确度很高的方法之一,但是由于烘干法时间周期较长、测量步骤烦琐等原因,该方法不适用于实时灌溉技术的发展.推测土壤含水量的另一类方法是通过监测土壤的失水量来估算土壤中水分的剩余量,其中最典型的就是蒸散模型.根据水量和能量平衡的原理,PENMAN^[16]研究总结出了蒸散模型——彭曼公式.该模型长期以来作为诊断土壤水分的有效方法,并且后来的学者在该模型基础上进行了不断的研究和改进.例如,PRICE 等^[17]在1989年提出了森林平衡蒸发模型,该模型就是以彭曼公式为基础进行研究的.但是,彭曼公式及其衍生模型需要监测水气压、水温、大气湿度和密度、净辐射等参数,数据繁多,也很难为实时灌溉的技术

提供有力支持.而本试验研究土壤水势与时间的关系,发现不同含水量时,土壤水势与时间的关系曲线呈 S 形,Logistic 方程能很好地拟合两者之间的关系.通过该模型,可以获取不同时间土壤水分情况.

文中以土壤含水量为主要控制因素,监测土壤水势与土壤含水量之间的变化.利用吉布斯自由能公式,拟合壤质黏土和壤土的水分特征曲线,根据该模型可以反演土壤含水量,从而获取土壤水分信息.与此同时,建立 2 种土壤 4 种水分梯度下土壤的水势随时间变化关系,进而获取 2 种土壤 4 种水分梯度下土壤含水量随时间变化模型,验证这些模型的准确性,比较不同土壤不同水分状况下保水能力和失水速率.该研究可为依据土壤水势进行实时灌溉提供技术支持.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验于 2014 年 4 月,在镇江不同地点采集 2 种典型的土壤,土壤类型分别为壤土(loam)和壤质黏土(loam clay),土壤容重分别为 1.32 g/cm^3 和 1.19 g/cm^3 .用环刀法测得其田间持水量,分别为 23.8% 和 35.4% (均为质量含水率).

1.2 试验方法

1.2.1 土壤样本的获取

不同水分的土壤样本:取所选的 2 种土壤,风干粉碎,分别称量 5 kg 干土,加水饱和后,连续干旱,可获得不同水分状况的土壤样本.

干旱处理土壤样品:设置 4 个土壤水分梯度,其中 3 个干旱水平,1 个对照组正常供水.取所选的 2 种土壤,风干粉碎,将 16 kg 土壤装入到培养盆中,作为 1 个处理.3 个干旱梯度土壤含水量分别为田间持水量的 70% ~ 75% (T1:轻度干旱)、60% ~ 65% (T2:中度干旱)、50% ~ 55% (T3:重度干旱),对照组含水量为田间持水量的 85% ~ 90%,用 CK 表示.壤土分别用 Td1, Td2, Td3 表示,正常供水土壤用 CKd 表示;同样,壤质黏土也设置 3 个干旱水平,土壤含水量与壤土相同,分别用 Tc1, Tc2, Tc3 表

示,正常供水处理用 CKc 表示.当水分梯度满足上述要求时,开始干旱胁迫.每天取出土壤即为干旱处理土壤样品.

1.2.2 数据测定

采用 PSYPRO 露点水势仪检测 2 种土壤的水分特征曲线,即测量不同含水量下的土壤水势.

1.2.3 统计与分析

采用 Excel 2010 和数据统计软件 SPSS 19.0 进行数据的统计分析;采用科学绘图软件 Systat Sigma-Plot 12.5 进行图表的绘制和数据的统计等.

2 结果与分析

2.1 2 种土壤含水量与水势的关系

吉布斯自由能公式^[18]可表示为

$$\Delta G = G_0 + RT \cdot \ln Q, \quad (1)$$

式中: G 为吉布斯自由能; G_0 为同一温度、标准压强下的吉布斯自由能; R 为气体常数; Q 为反应熵.

由吉布斯函数导出的土壤水势与含水量之间的关系可表示为

$$(1 + P) \psi_s = \psi_0 + k \ln(1 + P), \quad (2)$$

式中: ψ_s 为待测土壤水势,MPa; P 为待测土壤含水量; ψ_0 和 k 为模型参数.从式(2)可以看出,当 $P = 0$ 时 $\psi_s = \psi_0$,即 ψ_0 表示土壤含水量为 0 时,土壤水势值的大小,该值反映了土壤对水的吸附能力.

对不同水分的土壤样本的水势与相应的含水量用式(2)进行拟合,如图 1 所示,图中 WP 为土壤水势,Lc 表示壤质黏土,Ld 表示壤土,WC 为土壤含水量.拟合的效果如表 1 所示, R^2 为决定系数.

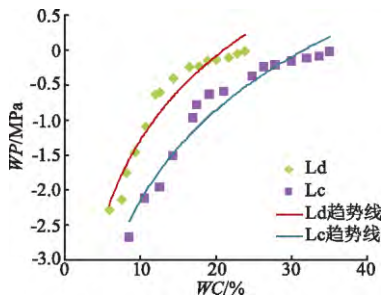


图 1 土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil moisture characteristic curves

由表 1 可知,2 种土壤的水势值与含水量之间的相关系数都在 0.970 以上,说明式(2)能很好地拟合土壤水势和含水量之间的关系,且从参数 j 可知,壤土对水的吸附能力小于壤质黏土.

表 1 壤质黏土和壤土土壤水分特征曲线的拟合效果
Tab. 1 Simulation results of models of soil moisture characteristic curves

土壤类型	方程和参数		
	R^2	k	j
壤土	0.978	19.92	-3.68
壤质黏土	0.991	26.74	-4.49

2.2 连续干旱时土壤水势的变化

持续性干旱的目的在于研究 2 种土壤不同水分梯度下,土壤水势和时间 t 之间的变化关系,结果如图 2 所示.

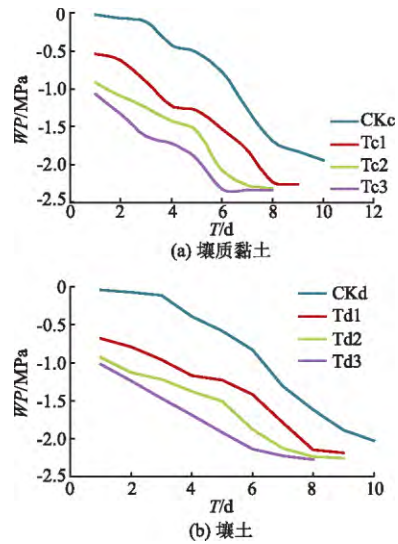


图 2 土壤水势与时间的关系

Fig. 2 Relationship between soil water potential and moisture losing time

图 2a 是壤质黏土在持续干旱的情况下,土壤水势随时间的变化情况.从图中可以看出,对照组 (CKc) 在前 4 天水势下降较缓,第 5-8 天下降速率较快.而轻度和中度干旱情况下,土壤水势变化相近,即前 6 天下降速率较高,而后趋于平缓.然而重度干旱情况下,土壤水势前期下降速率变化很小,从第 5 天开始趋于稳定.从 4 个水势随时间的变化曲线也可以看出,CKc, Tc1, Tc2 和 Tc3 水势值开始稳定的时间依次降低,说明初始含水量的减少加速了稳定期的到来.

图 2b 反映的是壤土在连续干旱的情况下,水势值与时间的关系.整体上,壤土水势变化趋势与壤质黏土相比同样是先慢后快,最后趋于平缓.不同之处在于:

- 1) 2 种土壤在相同干旱水平情况下,壤质黏土的快速下降期集中在第 3-6 天,而壤土从连续干旱开始至第 6 天,下降速率变化较小.
- 2) 土壤水势趋于稳定时,壤土的水势值为

-1.38 ~ -1.41 MPa, 而壤质黏土为 -1.46 ~ -1.54 MPa, 说明在水分严重缺失的情况下, 壤质黏土的土壤吸水力要高于壤土。

由于土壤粒径不同, 土壤对水分的吸附能力存在差异。壤质黏土粒径较壤土小, 对水分的吸附能力强于壤土, 所以在相同土壤含水量下, 壤质黏土的吸附能力更强, 一方面表现为壤质黏土土壤水势较低; 另一方面表现为壤质黏土水势下降速率较慢。

根据图2土壤水势与时间关系, 可以看出其曲线与S形相似, 基本符合Logistic方程曲线。为了能定量地分析不同条件下土壤水势和时间的关系, 对不同情况下的水分情况进行4参数的Logistic方程拟合。参数的Logistic方程为

$$Y = Y_0 + \frac{a}{1 + (X/X_0)^b} \quad (3)$$

式中: Y_0 为对数期的初始水势情况; a 为水分下降幅度; X_0 为对数时段内水分达到50%所需时间。在对数期的水分下降速率(GR_{50})为 $GR_{50} = -ab X_0/4$; 对数期时间(DT_{log})为 $DT_{log} = -4X_0/b$; 水分下降进入对数期的时间(DT_s)为 $DT_s = X_0 + 2X_0/b$ 。

经过拟合, 其定量关系如表2所示。

表2 用Logistic方程估计2种土壤的水势与时间的关系

Tab. 2 Relationship between soil water potential and moisture losing time estimated by Logistic equation

土壤类型	水分处理	模型参数					R
		X_0	a	GR_{50}	DT_{log}	DT_s	
LC	CKc	1.38	1.638	0.070 8	5.42	3.13	0.994
	Tc1	1.11	1.523	0.089 1	4.09	2.74	0.989
	Tc2	0.97	1.401	0.090 0	3.65	1.92	0.998
	Tc3	0.66	1.136	0.070 9	3.29	1.60	0.997
LD	CKd	1.43	1.407	0.081 8	5.56	2.98	0.998
	Td1	1.21	1.315	0.129 1	4.39	2.53	0.992
	Td2	1.01	1.262	0.331 0	3.62	1.77	0.987
	Td3	0.67	1.304	0.078 3	2.99	0.96	0.999

从表2可见2种土壤不同水分情况下, 含水量与时间之间的相关系数R均大于0.987, 说明土壤水势和时间存在高度相关性。从 GR_{50} 可知2种土壤在轻度和中度干旱的情况下水分散失最快, 因为对照组初始含水量较高, 前期的水分散失对土壤水势的影响较小。然而, 在轻度和中度干旱水平时, 水分的散失对土壤水势影响很大, 对数中期水势值下降速率较另2组要快; 重度干旱的情况下2种土壤水分散失较对照组均较快, 但是明显低于轻度和中度干旱组。这是因为土壤含水量低时, 土壤水分的继续减少对其水势值的影响也会降低。 DT_s 反映的是对数期的开始时间, 分析数据显示2种土壤对数期

的出现时间随着干旱梯度的增加而减短; 2种土壤的对照组和轻度干旱组出现拐点的时间分别为3.13 2.74 d和2.98 2.53 d, 明显大于中度和重度干旱组。同时发现, 同等水分梯度下, 壤土对数期的出现时间均早于壤质黏土, 这说明在较高含水量的情况下, 壤土的持水能力要低于壤质黏土。

为了验证式(2)对土壤水势与含水量之间关系的准确性, 同时也为了验证Logistic方程对土壤水分与时间关系拟合的精确度, 利用2种土壤4种水分梯度连续干旱下的土壤水势代入式(2)求解相应土壤含水量。对其随时间变化趋势进行拟合, 发现Logistic方程也能高度拟合土壤含水量(推算得出)和时间之间的关系。其定量关系如表3所示。

表3 用Logistic方程拟合2种土壤含水量与时间之间的关系

Tab. 3 Relationship between soil water content and moisture losing time estimated by Logistic equation

土壤类型	水分处理	模型参数				
		X_0	GR_{50}	DT_{log}	DT_s	R
LC	CKc	1.44	0.258	5.71	3.43	0.975
	Tc1	1.17	0.351	4.68	2.68	0.982
	Tc2	1.03	0.232	4.20	1.51	0.963
	Tc3	0.91	0.173	3.59	1.38	0.977
LD	CKd	1.58	0.221	5.68	3.72	0.933
	Td1	1.35	0.282	4.46	2.79	0.969
	Td2	1.14	0.191	3.75	1.85	0.986
	Td3	0.82	0.110	2.86	1.53	0.974

从表3可知, 土壤不同初始含水量情况下, 对数期(DT_s)的出现时间也不相同, 即干旱水平高的对数期的出现时间比较晚一些, 这也是由于重度水分亏缺的情况下, 水分损失对土壤水势值的影响较小造成的。然而, 当土壤含水量在高水平(低于田间持水量)的情况下, 水分的变化对水势值的影响很大。所以相对水分亏缺严重的土壤, 含水量高的对照组和轻度干旱组对数期的出现时间要早一些。通过对 DT_{log} 和 DT_s 的分析, 表2和表3中两者之间的变化趋势以及数值大小是一致的。说明Logistic方程能有效表达土壤水分和时间之间的变化关系。

3 讨论

土壤水势包括重力势、溶质势和基质势等, 其中溶质势和基质势是影响土壤水势大小的主要部分, 而且对植物的吸收利用有很大影响。本试验根据吉布斯自由能公式, 导出土壤的含水量与土壤水势的关系模型, 用该模型可以很好地拟合2种土壤的水势和含水量之间的关系。

2种土壤不同水分梯度下,土壤水势与时间的关系可以用 Logistic 方程进行拟合.依据土壤水势可以逆推得出土壤含水量,同样可以用 Logistic 方程很好地拟合连续干旱下的土壤含水量和时间的关系曲线.

有研究表明,在壤质黏土和壤土条件下,当土壤含水量分别为 7.40% 和 11.67% 时,小麦开始出现萎蔫现象^[19].根据小麦的凋萎含水量情况,可由 Logistic 方程推测生长在上述 2 种土壤 4 种水分梯度下小麦的灌水时间.在壤质黏土 4 个水分梯度条件下,依次需要灌水的时间为 7.9、6.8、6.3、4.7 d;壤土条件下,依次为 8.1、7.2、6.7、5.2 d.从以上数据可以看出 2 种土壤同等水分条件下,小麦需要灌水的时间不同.充足供水时,壤土条件下的小麦需要的灌水时间稍晚于壤质黏土;同样,3 个控水组同等水分条件下,壤土培养的小麦需要的灌水时间均晚于壤质黏土,证明壤土对保持作物可利用水分的能力要高于壤质黏土.在不同土壤和水分条件的灌水量根据作物对水分的需求不同,可确定不同的灌水量.

4 结 论

壤土和壤质黏土在连续失水试验结果表明,由吉布斯自由能公式导出的土壤水势和含水量的关系模型 $(1+P)\psi_s = \psi_0 + k\ln(1+P)$ 的精确性很高,能很好地拟合土壤水分特征曲线,依据该模型,可以推测土壤水分状况,为作物灌溉等提供水分信息;通过该模型的 ψ_0 值可知,进一步证明了壤土对水的吸附能力小于壤质黏土;研究同时发现,通过不同初始含水量土壤水分随时间的变化,Logistic 方程在表达土壤水分和时间变化关系上具有很高的精确性.

在灌溉技术迅猛发展的今天,土壤水势的监测已经很成熟.在最近的研究中,土壤水势的观测多利用露点水势仪 PSYPRO 进行实时在线监测,数据准确性很高. TDR 剖面土壤水分测量(土壤含水量)系统同样也可以在线监测土壤水分体积含水量,但是,由于土壤盐碱度的差异,相同体积含水量的 2 种土壤上植物的生理需水量是不同的,即其土壤水势不同,所以不利于不同土壤灌水量的确定;同样,烘干法精确度虽然高,但是费时费力,不利于实时监测;而基于彭曼公式的蒸散模型则需要大量的土壤和气象等信息,也很难在短时间内获得土壤水分信

息.根据本试验拟合了 2 种土壤的含水量和水势之间,土壤含水量与时间,以及土壤水势与时间的关系,则可通过实时监测土壤水势,确定土壤含水量,从而得出需要灌水量和灌水时间,避免了烦琐的数据采集和整理,为实时灌溉技术提供了精确的技术支持.

参考文献(References)

- [1] ARASAN S,AKBULUT S,HASILOGLU A S. The relationship between the fractal dimension and shape properties of particles [J]. Journal of civil engineering, 2011, 15(7): 1219-1225.
- [2] 刘彬,罗承德,张健,等. 干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(1): 58-66.
LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al. Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River [J]. Acta ecologica sinica, 2011, 31(1): 58-66. (in Chinese)
- [3] LOREAU M, NAEEM S, INCHAUSTI P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges [J]. Restoration ecology, 2001, 294(5543): 804-808.
- [4] RUBIO A, ESCUDERO A. Small-scale spatial soil-plant relationship in semi-arid gypsum environments [J]. Plant and soil, 2000, 220(1/2): 13-150.
- [5] 李春友,任理,李保国. 利用优化方法求算 Van Genuchten 方程参数 [J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 473-478.
LI Chunyou, REN Li, LI Baoguo. Parametric estimation of the Van Genuchten's Equation by the optimization method [J]. Advances in water science, 2001, 12(4): 473-478. (in Chinese)
- [6] ŠIMUNEK J, JARVIS N J, VAN GENUCHTEN M T, et al. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone [J]. Journal of hydrology, 2003, 272(1): 14-35.
- [7] 姚其华,邓银霞. 土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展 [J]. 土壤通报, 1992, 23(3): 142-145.
YAO Qihua, DENG Yinxia. The research of soil water characteristic curve model and its forecast method [J]. Chinese journal of soil science, 1992, 23(3): 142-145. (in Chinese)
- [8] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for

- predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils** [J]. Soil science society of America journal, 1980, 44 (5): 892 - 898.
- [9] SHAO M A, HORTON R. Integral method for estimating soil hydraulic properties [J]. Soil science society of America journal, 1998, 62(3): 585 - 592.
- [10] 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎. 基于两组负水头入渗数据推求 Brooks - Corey 模型中的参数 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 1 - 6.
ZHOU Chaowang, XUE Xuzhang, ZHANG Renduo. Estimating Brooks - Corey model parameters based on soil water infiltration data under two kinds of negative water pressures [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (8): 1 - 6. (in Chinese)
- [11] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 51 - 56.
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua, et al. Pedo-transfer functions of soil water retention curve based on joint multifractal [J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(3): 51 - 56. (in Chinese)
- [12] JACKSON R D, KUSTAS W P, CHOUDHURY B J. A reexamination of the crop water stress index [J]. Irrigation science, 1988, 9(4): 309 - 317.
- [13] LAMBOT S, WEIHERMÜLLER L, HUISMAN J A, et al. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content [J]. Water resource research, 2006, 42 (5): 114 - 119.
- [14] KELLENERS T J, SOPPE R W O, AYARS J E, et al. Calibration of capacitance probe sensors in a saline silty clay soil [J]. Soil science society of America journal, 2004, 68(5): 770 - 778.
- [15] BINDLISH R, BARROS A P. Multifrequency soil water inversion from SAR measurements with the use of IEM [J]. Remote sensing of environment, 2000, 71(1): 67 - 88.
- [16] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. [J]. Mathematical and physical sciences, 1948, 19(3): 120 - 146.
- [17] PRICE D T, BLACK T A. Estimation of forest transpiration and CO₂ uptake using the Penman-Monteith equation and a physiological photosynthesis model [J]. Estimation of areal evapotranspiration, 1989, 17(2): 213 - 227.
- [18] 张颖. 吉布斯自由能的多功能性质探讨 [J]. 大学化学, 2011, 26(2): 67 - 72.
ZHANG Ying. The research on the multi functional properties of Gibbs free energy [J]. University chemistry, 2011, 26(2): 67 - 72. (in Chinese)
- [19] 皱文安, 姜波, 顾李华. 土壤水分常数的测定 [J]. 水文, 2015, 35(4): 62 - 66.
ZHOU Wenan, JIANG Bo, GU Lihua. Measurement of soil moisture constants [J]. Journal of China hydrology, 2015, 35(4): 62 - 66. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)

(上接第 324 页)

- [15] 高慧敏, 刘宪林, 徐政. 水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 5 - 8.
GAO Huimin, LIU Xianlin, XU Zheng. Effect of detailed hydro turbine models on analysis results of power system transient stability [J]. Power system technology, 2005, 29(2): 5 - 8. (in Chinese)
- [16] ZENG Yun, GUO Yakun, ZHANG Lixiang, et al. Nonlinear hydro turbine model having a surge tank [J]. Mathematical and computer modelling of dynamical systems, 2013, 19(1): 12 - 28.
- [17] OLDENBRUGER R, DONELSON J. Dynamic response of a hydroelectric plant [J]. Power apparatus and systems, 1962, 81(3): 403 - 418.
- [18] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制 [M]. 周李信, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002: 270 - 278.
- [19] MELLO C, KOESSLER R J. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies [J]. IEEE transactions on power systems, 1992, 7(1): 167 - 179.

(责任编辑 朱漪云)