

# 基于混合高斯模型渗灌复合材料导水特性分析

王晓健<sup>1</sup>, 毛一剑<sup>2</sup>, 张增志<sup>1\*</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 生态功能材料研究所, 北京 100083;

2. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

**摘要:** 为了定量研究由蒙脱土和聚丙烯酰胺制备而成的渗灌复合材料导水特性与其组分之间及土壤湿度的关系, 该文利用混合高斯模型模拟求解渗灌复合材料的平衡导水率、材料组分比例及土壤湿度之间的关系。设置 9 组组分比例不同(蒙脱土与聚丙烯酰胺质量比 5~25)的渗灌复合材料在 8 个土壤湿度(土壤质量含水率 3%~17%)下进行建模, 另外 2 组((蒙脱土与聚丙烯酰胺质量比 8 和 18)不同的组分制备而成复合材料在 2 组不同土壤湿度(土壤质量含水率 4%和 14%)下进行验证。结果表明: 建立的渗灌复合材料平衡导水率与材料组分的关系函数, 相应模拟值与实测值之间的均方根误差(root mean squared error, RMSE)  $\leq 25.87$  g/h, 误差平方和(sum of squares of error, SSE)  $\leq 160$ , 决定系数(coefficient of multiple determination,  $R^2$ )  $\geq 0.8933$ , 利用混合高斯模型模拟平衡导水率、材料组分关系函数的相关参数与土壤湿度之间的关系, 相应模拟值与实测值之间的 RMSE  $\leq 195$  g/h, SSE  $\leq 98350$ , 决定系数  $R^2 \geq 0.6868$ , 说明利用混合高斯模型拟合渗灌复合材料的平衡导水率、材料组分比例及土壤湿度之间的关系函数具有很好的稳定性、可行性及精确性; 经验证, 平衡导水率、材料组分比例及土壤湿度关系函数的模拟值与实测值之间的最大相对误差为 14.14%, 表明用该函数模拟渗灌复合材料 H-C-M 之间关系的可靠性。该研究对于后续的渗灌材料的研制及应用具有指导意义。

**关键词:** 材料; 土壤湿度; 灌溉; 渗灌; 平衡导水率; 混合高斯模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.012

中图分类号: S11<sup>+</sup>9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0087-06

王晓健, 毛一剑, 张增志. 基于混合高斯模型渗灌复合材料导水特性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 87-92.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.012 http://www.tcsae.org

Wang Xiaojian, Mao Yijian, Zhang Zengzhi. Gaussian mixture model for water-conduction performance of infiltrating irrigation composite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 87-92. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.012 http://www.tcsae.org

## 0 引言

渗灌是一种借助土壤毛细管作用湿润土壤的灌水方法, 目前在农田中已进行了一定的应用, 许多学者也对此进行了试验研究<sup>[1-4]</sup>。

HouWen 等都利用回归分析探究土壤性质(包括土壤粘土含量、土壤容重、土壤湿度等)、水的温度、渗灌器工作压力及其结构参数等对渗灌器流量的影响<sup>[5-7]</sup>, 相应的计算模型为渗灌器的设计及管理提供了具有实用性的指导工具。

张增志等所设计的一种渗灌用复合材料<sup>[8-9]</sup>可因土壤环境的不同调节土壤湿度<sup>[10]</sup>, 对该复合材料的制备、表征及相应性能已经进行了一系列的研究探讨<sup>[11-14]</sup>, 其中吸脱附水速率和导水速率是用来评价材料对外界环境的

反应灵敏程度和对水分的传导性能的重要指标。对材料的吸脱附水速率与材料组分的数值关系已进行了相应研究, 并建立了表征两者关系的数学模型<sup>[15]</sup>, 然而该材料的导水率与组分的关系仍没有得到可靠地定量数值分析, 这将使渗灌材料在后续的生产应用当中缺少一定的理论指导。

混合高斯模型是由 Stauffer 等提出的经典的自适应混合高斯背景提取方法, 是一种基于背景建模的方法, 混合高斯模型是有限个高斯函数的加权和, 由于任意形状的概率分布都可以用多个高斯分布函数去近似, 所以它能描述图形的多峰状态<sup>[16-17]</sup>。文献[15]中利用拉普拉斯变换定量分析渗灌材料的吸水特性, 该方法虽然在数值上对其进行了表征, 但是在实际应用中, 该方法需要对样品的吸水量一些初始值进行测定, 过程相对繁琐, 而混合高斯模型, 则是通过一定的曲线拟合, 找出自变量与变量之间的对应关系, 在之后的应用过程中, 只需要提供几个初始变量即可对所要求的结果进行计算。

本研究利用混合高斯模型对所建立的平衡导水率与材料组分比例及土壤环境湿度之间的数学函数进行求解, 定量表征复合材料导水能力与材料组分及土壤湿度之间的关系, 旨在为渗灌复合材料在实际中生产应用提供一定的理论依据。

收稿日期: 2015-05-10 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50772131); 教育部科学技术研究重点项目资助项目(106086)

作者简介: 王晓健, 女, 吉林人, 主要从事生态功能材料研究。北京 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 100083。

Email: wangxiaojian2006@163.com

\*通信作者: 张增志, 男, 河北人, 教授, 主要从事生态功能材料研究。北京 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 100083。

Email: 1255295528@qq.com

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原料

纳米蒙脱土 (nano-montmorillonite, MMT): 蒙脱石质量分数 96%, 离子交换量为 100 mmol/100 g (浙江丰虹新材料股份有限公司); 聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM, 法国爱森公司): 分析纯, 常温密度 1.302 g/cm<sup>3</sup>, 平均分子量 1 200 万。

### 1.2 渗灌复合材料制备

参考文献[18], 采用 MMT 及 PAM 以不同比例 (表 1) 制备渗灌复合材料。因 MMT:PAM<5 时, 渗水量不能满足沙漠中植物对水分的最低需求, 而 MMT:PAM>25 时, 导水量过大, 超过植物水分需求量, 浪费水资源, 故 MMT:PAM 设置为 5~25。其中, 材料 A~I 用于建立导水率曲线模型。所得复合材料烘干后缩聚为柱状固体, 将材料用研钵研磨至粉末状 (粒径 $\geq 37 \mu\text{m}$ ), 称取 0.05~0.1 g, 装到直径 5 mm、高 200 mm 的玻璃管末端 (样品两端用脱脂棉固定), 玻璃管上标有刻度值 (mL)。

表 1 不同聚丙烯酰胺和蒙脱土比例的渗灌复合材料设计  
Table 1 Design for infiltrating irrigation composite with different ratios of montmorillonite (MMT) and polyacrylamide (PAM)

处理 Treatments	蒙脱土: 聚丙烯酰胺 MMT:PAM/(g:g <sup>-1</sup> )
A	5:1
B	7.5:1
C	10:1
D	12.5:1
E	15:1
F	17.5:1
G	20:1
H	22.5:1
I	25:1

### 1.3 渗灌复合材料导水试验

根据表 1 比例制备的样品用于导水试验, 各处理设 3 次重复, 试验方法参考文献[19]。常压下, 将装有复合材料粉末的玻璃长管置于不同含水量的土壤之中, 土壤含水量 (质量含水率) 设为 3%、5%、7%、9%、11%、13%、15%、17%, 由于荒漠化地区降水量少, 环境很干燥, 故其中 3%~7% 的湿度为沙土环境, 其余三者为土壤环境<sup>[20-21]</sup>。玻璃管中有足量的水分; 土壤干重约为 250 g, 放在烧杯中, 各烧杯放在设定湿度和温度分别为 50% 和 25℃ 的人工气候箱内, 以保证试验中土壤环境不随外界环境变化。24 h 后 (导水基本达到平衡)<sup>[22]</sup>, 每隔 2 h 定时记录液面下降高度, 各记录 3 次, 因为玻璃管上方是密封的, 故水分的减少是通过复合材料的传导来实现的, 因此通过测量失水量即可计算出复合材料的导水率, 每组各设置 3 组平行试验, 取平均值得平均导水率 (g/h)。

### 1.4 渗灌复合材料自调节导水曲线函数

渗灌复合材料导水过程是水分通过复合材料从高水势一端传导至低水势一端, 高水势一端水分 100%, 低水势一端的水分随不同土壤环境而不同; 复合材料在导水过程中的导水率随着时间的变化而变化, 当达到一定

的时间, 导水率会达到一个稳定值, 即平衡导水率, 同一组分的渗灌复合材料在不同土壤环境下的平衡导水率不同, 不同组分比例的复合材料在同一土壤环境中的平衡导水率亦不同。因此, 将平衡导水率  $K$  与土壤湿度  $H$  和材料组分  $C$  的关系用函数表示为:

$$K = \beta \cdot f(H, C) + \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为函数的系数;  $\varepsilon$  为试验误差。

### 1.5 函数求解

为求解式 (1), 需要完成一系列试验, 在特定的因素水平时测定平衡导水率  $K$ , 平衡导水率  $K$  的结构矩阵  $D$  为  $k$  维欧几里得空间, 表示如下:

$$D = \begin{bmatrix} K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1k} \\ K_{21}, K_{22}, \dots, K_{2k} \\ \vdots, \vdots, \dots, \vdots \\ K_{n1}, K_{n2}, \dots, K_{nk} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

式中:  $K_{ij}$  表示第  $i$  个处理第  $j$  个影响因素所得到的平衡导水率, 由导水试验实测获得, g/h;  $n$  和  $k$  分别为总的试验处理数和影响因素设计水平数。本研究设计了 9 个组分水平和 8 个土壤湿度水平, 故  $n$  和  $k$  取值分别为 9 和 8, 矩阵  $D$  为 9 维的欧几里得空间, 包含 72 个试验设计点。

首先, 根据渗灌材料导水率试验值  $K$  和材料组分  $C$ , 利用 MATLAB 中拟合工具箱 cftool, 采用混合高斯模型对数据进行拟合, 得到材料组分与导水率之间的函数关系  $g(C)$ , 并求其系数。然后, 采用混合高斯模型拟合获得的各系数与土壤湿度  $H$  的关系, 将之代入  $g(C)$  中, 即得到式 (1) 的具体函数表达式。

### 1.6 函数验证

设定样本进行导水试验, 复合材料比例取 8、18 g/g, 土壤质量分数 4%、14%, 验证模拟得到的函数在不同组分、不同土壤湿度时是否适用。

## 2 结果与分析

### 2.1 渗灌复合材料导水率模拟值与实测值

以土壤质量含水率为 3%、7%、11% 和 15% 为例, 模拟获得的渗灌用复合材料导水率曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 利用拟合曲线上的数值可以描述相应的实测值; 在各个图中, 都出现了明显的峰值, 这是由于材料本身的性质与土壤中水分含量交互作用所致, 如图 1a~d, 土壤水分质量分数<15% 时, 在材料比例大致为 6~8 以及 13 时出现峰值, 这是因为比例为 6~8 及 12~13 的材料在导水平衡时, 是都具有溶胀均匀的网络结构, 因此可使水分相对其他比例的材料更加顺利的在期间进行传导, 在图像上显示为相应的峰值。

### 2.2 建立导水率模型

根据式 (3) 建立材料导水率与材料组分比例之间的关系为:

$$K = a_1 \cdot e^{-\frac{(C-a_2)^2}{a_3}} + a_4 \cdot e^{-\frac{(C-a_5)^2}{a_6}} + a_7 \cdot e^{-\frac{(C-a_8)^2}{a_9}} \quad (3)$$

式中:  $a_1 \sim a_9$  分别为拟合系数, 其值见表 2。

由表 2 可知, 土壤质量含水率>9% 时的模拟曲线

误差平方和 (sum of square of error, SSE) 值相对较大, 达到 160, 由于在土壤湿度较大时, 渗灌复合材料在各个组分比例达到导水平衡时的导水率之间呈现的波动较小, 平衡导水率的试验点在图中与湿度 $\leq 9\%$ 相比表

现出相对平稳的趋势, 因此, 根据高斯曲线特性, 利用高斯曲线的三项拟合则会出现相对较高的误差; 但该模拟得到的  $RMSE \leq 25.87 \text{ g/h}$  和决定系数  $R^2 \geq 0.893$ , 表明拟合较好。

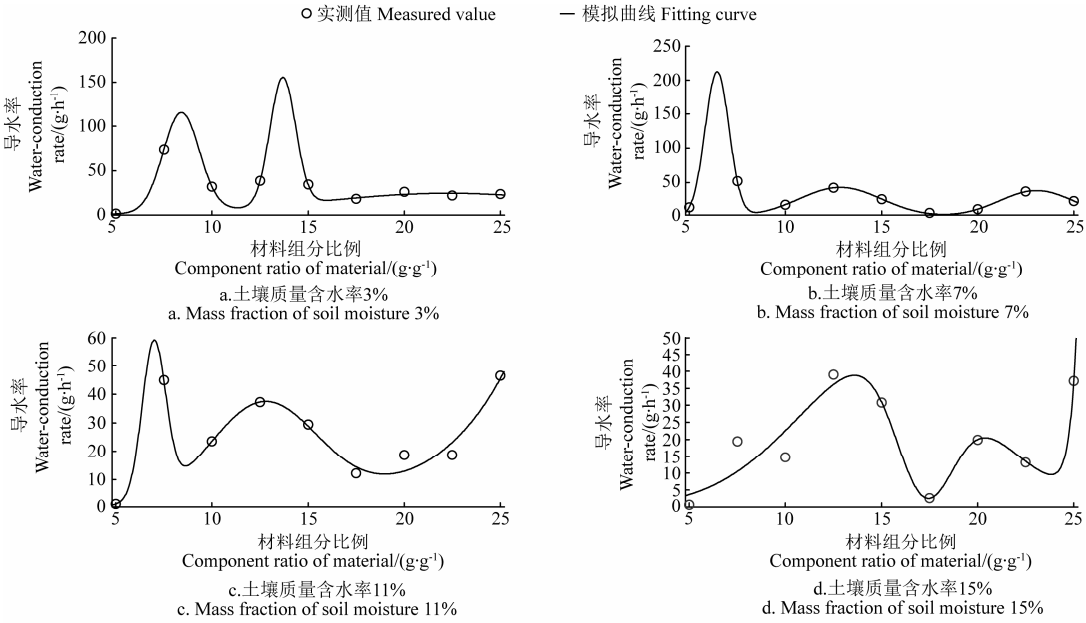


图 1 渗灌材料在不同土壤湿度环境下的模拟曲线

Fig.1 Fitting curves of infiltrating irrigation material under different soil moisture environment

表 2 不同土壤湿度下以材料组分比例为自变量和导水率为因变量的模型拟合参数及评价

Table 2 Parameters of models with material composites ratios as variables and water-conduction rate as response variables and assessment under different soil moisture treatments

土壤质量含水率 Mass fraction of soil moisture/%	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$R^2$	RMSE/ (g·h <sup>-1</sup> )	SSE
3	112.3	8.403	1.337	144.7	13.68	0.940	24.41	22.3	9.72	0.995	12.09	17.04
5	121.7	8.325	1.37	125.7	13.57	0.970	24.42	23.24	6.103	0.997	15.05	16.17
7	211.9	6.449	0.877	42.99	12.85	3.034	38.35	23.06	2.729	0.999	25.87	1.928
9	149.1	3.447	1.728	1018	-0.1899	0.0965	41.89	-0.9456	0.2784	0.977	10.81	33.79
11	5.557e+16	282.6	43.71	54.13	6.984	0.8653	35.95	12.71	4.017	0.968	18.51	59.45
13	3658	4.96	1.634	450	-1.273	0.0997	31.9	-0.511	-0.5112	0.969	4.981	32.44
15	43.66	15.35	6.609	2.63e+16	49.49	4.18	-37.4	17.21	2.117	0.895	12.5	160
17	61.24	24.22	1.245	34.53	12.4	2.677	162.7	18.79	0.854	0.893	11.8	143.5

注:  $a_1 \sim a_9$  分别为模型拟合参数, 下同。  
Note:  $a_1 \sim a_9$  are model coefficients, same as below.

建立系数  $a_1 \sim a_9$  关于土壤湿度的函数为:

$$a_l(H) = A_{l1} \cdot e^{\frac{-(H-A_{l2})^2}{A_{l3}}} + A_{l4} \cdot e^{\frac{-(H-A_{l5})^2}{A_{l6}}} \quad (4)$$

式中:  $A_{l1} \sim A_{l6}$  分别为对于  $a_l$  的模型拟合参数 ( $l=1, 2, \dots, 9$ ), 其值见表 3。

表 3 材料组分和导水率模型拟合参数与土壤水分拟合参数及评价

Table 3 Parameters of models with soil moisture and coefficients of equations of material composite ratio and water-conduction rate and fitness assessment

系数 Coefficients	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$R^2$	RMSE/(g·h <sup>-1</sup> )	SSE
$a_1$	5.557e+16	5.557e+16	0.1968	7558	7558	1.412	1	195	98350
$a_2$	3.697e+16	14.81	0.3203	1019	9.038	1.145	1	137.7	36740
$a_3$	1.492e+17	27.03	1.708	45.05	8.133	4.616	0.8948	33.73	2275
$a_4$	472.5	10.51	0.6798	24.52	17.38	3.477	0.9972	9.525	181.5
$a_5$	183.1	15.82	0.7181	14.82	4.326	4.388	0.9626	5.71	65.21
$a_6$	25.13	4.545	4.545	187.9	16.01	0.6526	0.6868	10.49	220.3
$a_7$	82.88	10.42	0.7227	6.629	14.91	1.615	0.9971	1.489	4.434
$a_8$	5.771	15.79	1.385	3.415	6.527	1.368	0.8969	0.9014	1.625
$a_9$	10.09	2.231	3.925	4.43	12.34	3.193	0.995	0.3806	0.2898

注:  $A_1 \sim A_6$  分别为模型拟合系数。  
Note:  $A_1 \sim A_6$  are model coefficients.

表 3 表明,模型(4)模拟的 RMSE 的最大值为 195,  $SSE \leq 98350$ , 决定系数  $R^2 \geq 0.6868$ , 其中,  $a_1 \sim a_3$  及  $b_1$  模型的 SSE 的值相对较大,这是由于在材料导水率—比例拟合过程中,  $a_1 \sim a_3$  及  $b_1$  的值在相应湿度时相对较大(表 2)。总体而言,利用高斯曲线拟合不同土壤湿度下各个材料组分比例之间的关系,拟合土壤含水率与方程各个系数之间的关系曲线,各个方程的自变量对因变量的解释能力较强,回归方程对于数据变化表现出较好的拟合性,表明了应用混合高斯模型描述渗灌材料导水曲

线函数的可行性。

将式(4)代入式(3)得渗灌用复合材料水分传导能力与材料成分及土壤湿度的关系:

$$K = a_1(H) \cdot e^{-\frac{(C-a_2(H))^2}{a_3(H)}} + a_4(H) \cdot e^{-\frac{(C-a_5(H))^2}{a_6(H)}} + a_7(H) \cdot e^{-\frac{(C-a_8(H))^2}{a_9(H)}} \quad (5)$$

2.3 模型验证

将复合材料比例 8 和 18 g/g,土壤质量分数 4%和 14%代入式(4)和式(5),计算导水率模拟值,与试验值比较,如表 4 所示。

表 4 导水率模拟值与实测值  
Fig.4 Simulated and measured values of water-conduction rate

土壤含水率质量分数 Mass fraction of soil moisture/%	材料组分比例 Material composite ratio/(g·g <sup>-1</sup> )	实测值 Measured values/(g·h <sup>-1</sup> )			模拟值 Simulated values/(g·h <sup>-1</sup> )	最小相对误差 Minimum relative error/%	最大相对误差 Maximum relative error/%
4	8	0.29	0.28	0.352	0.32	9.09	12.5
4	18	10.14	11.54	9.024	10.3	1.55	14.14
14	8	0.04	0.05	0.045	0.05	0	11.11
14	18	0	0	0	0	—	—

从表 4 可以看出,  $K$  试验值与模拟值最大相对误差为 14.14%,最小相对误差为 0,均小于可接受范围 20%,说明基于混合高斯模型估算渗灌复合材料导水率  $K$  具有一定的可信度和准确度。

3 结 论

利用混合高斯模型将渗灌材料的导水系统数值化,建立了该材料的平衡导水率  $K$  与材料组分  $C$  及土壤湿度  $H$  的关系函数,该函数可用来定量分析在不同土壤初始湿度的情况下,材料组分比例与其平衡导水率之间的关系,该模型在应用方面更简易方便,直接用自变量  $C$  和  $H$ ,即可对导水性进行预测,经试验分析,结果如下:

建立的由蒙脱土与聚丙烯酰胺制成的渗灌材料的的关系函数,相应模拟值与实测值之间的误差平方和  $\leq 160$ , 相关系数  $R^2 \geq 0.8933$ ,说明利用混合高斯函数模拟渗灌材料平衡导水率、材料组分的曲线具有可行性;

利用混合高斯模型模拟平衡导水率、材料组分关系函数的相关参数与土壤湿度之间的关系,相应模拟值与实测值之间的 RMSE  $\leq 195$ , 相关系数  $R^2 \geq 0.6868$ ;

平衡导水率、材料组分、土壤湿度三者的关系函数经验证,  $K$  实测值与模拟值最大相对误差为 14.14%,说明利用该函数模拟渗灌复合材料平衡导水率与材料成分及土壤湿度关系的可靠性。

本研究可为渗灌复合材料研究及其应用提供了理论依据,但仍需进一步研究在温度,土壤性质,水质因素影响下,材料组分与渗灌复合材料导水特性的关系,而且本研究结果需在实际应用中进行验证。

[参 考 文 献]

[1] Mitchell W H, Sparks D L. Influence of subsurface irrigation and organic additions on top and growth of fieldcorn[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(6): 1084—1088.

[2] Amoozegare F, Warrick A, Lomen A W. Design nomographsfor trickle irrigation systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,1984, 110(2): 107—120.

[3] Zetzsche J B, Newman J S. Subirrigation with plasticpipe[J]. Agriculture Engineering, 1966, 47(1): 74—75.

[4] Norris L Powell, Scott Wright F. Subsurface micro-irrigated corn and peanut : effect on soil Ph[J]. Agric Water Management, 1998, 36(2): 169—180.

[5] Hou Wen, Bai Dan, Zhou Wen.Experimental study on calculation model of labyrinth emitter discharge under subsurface drip irrigation[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2014, 7(6): 14—17.

[6] Ahmed I, Al-Amoud, Mohamed A, et al. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 580—585.

[7] Boštjan Naglic, Cedric Kechavarzi, Frederic Coulon,et al. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size[J]. Irrig Sci, 2014, 32(6): 421—425.

[8] Subodh Acharya, Rao S. Mylavarapu. Modeling shallow water table dynamics under subsurface irrigationand drainage[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 166—168.

- [9] 李根柱, 张增志, 韩海荣. 蓄水渗膜材料的研究及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 390—391.  
Li Genzhu, Zhang Zengzhi, Han Hairong, et al. Study and application of the water storage and controlled release film[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 390—391. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张增志, 王博涛. 聚丙烯酰胺/蒙脱土复合导水涂层材料的制备及自调节导水特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(12): 139—141.  
Zhang Zengzhi, Wang Botao. Preparation and self-regulating water conductivity properties of polyacrylamide/montmorillonite composite water-transmitting coating[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(12): 139—141. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张增志, 刘铭, 赵鑫. 对土壤湿度具有自调节功能的导水涂层纤维的研究[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1): 56—59.  
Zhang Zengzhi, Liu Ming, Zhao Xin, et al. Water-release coated fiber with the self-adjusting function to soil moisture[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2007, 25(1): 56—59. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张增志, 曹鹏, 张际飞. 层状黏土材料对导水纤维涂层脱附水性能的影响[J]. 材料工程, 2007(10): 50—53.  
Zhang Zengzhi, Cao Peng, Zhang Jifei. The effect of sandwich clay about desorption properties of water-release coated fiber[J]. Journal of Materials Engineering, 2007(10): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李根柱, 韩海荣, 张增志. 使用新材料蓄水渗膜造林试验研究初报[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 92—95.  
Li Genzhu, Han Hairong, Zhang Zengzhi. Preliminary study on application of new material-water storage and controlled-release film for afforestation experiment[J]. Science of Water and Soil Conservation, 2003, 1(4): 92—95. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张增志, 张利梅, 程海涛. 可调节土壤湿度的导水纤维功能薄膜的研究[J]. 材料工程, 2006(4): 17—19.  
Zhang Zengzhi, Zhang Li mei, Cheng Haitao. Functional film using coated fibers to adjust soil moisture[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(4): 17—19. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王晓健, 张增志, 毛一剑. 利用拉普拉斯变换模拟渗灌材料吸水特性曲线[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 87—88.  
Wang Xiaojian, Zhang Zengzhi, Mao Yijian. Simulation on water-absorption characteristic curve of infiltratin irrigation materials through Laplace-transform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 87—88. (in Chinese with English abstract)
- [16] Thanh Minh Nguyen, Jonathan Wu Q M, Hui Zhang. Bounded generalized Gaussian mixture model[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(9): 3132—3136.
- [17] Maryam Amirmazlaghani, Mansoor Rezghi, Hamidreza Amindavar. A novel robust scaling image watermarking scheme based on Gaussian Mixture Model[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(4): 1960—1966.
- [18] 张增志, 王晓健, 薛梅. 渗灌材料制备及导水性能分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 75—76.  
Zhang Zengzhi, Wang Xiaojian, Xue Mei. Preparation and hydraulic conductivity performance analysis of infiltration irrigation materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 75—76. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张增志, 张大伟, 徐海凤. 粉煤灰对粘土导水特性的影响研究[J]. 材料工程, 2008(7): 23—24.  
Zhang Zengzhi, Zhang Dawei, Xu Haifeng. Effect of fly ash on clay's characteristic of water conductivity[J]. Journal of Materials, 2008(7): 23—24. (in Chinese with English abstract)
- [20] 秦景, 贺康宁, 朱艳艳. 库布齐沙漠几种常见灌木光合生理特征与土壤含水量的关系[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(1): 37—43.  
Qin Jing, He Kangning, Zhu Yanyan. Relationship between photosynthetic physiological characteristics of several common shrub species and soil water content in Hobq Desert of Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1): 37—43. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王百田, 杨雪松. 黄土半干旱地区油松与侧柏林分适宜土壤含水量研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 80—83.  
Wang Baitian, Yan Xuesong. Study on befitting soil moisture of chinese pine and chinese arborvitae[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 80—135. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张利梅. 导水涂层材料的制备与性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.  
Zhang Limei. Preparation of the Water-Conduction Coating Composite[D]. Beijing: China University of Mining and Technology: Beijing, 2009. (in Chinese with English abstract)

# Gaussian mixture model for water-conduction performance of infiltrating irrigation composite

Wang Xiaojian<sup>1</sup>, Mao Yijian<sup>2</sup>, Zhang Zengzhi<sup>1\*</sup>

(1. *Research Institute of Ecological and Functional Materials, School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)*

**Abstract:** Infiltration irrigation is a promising water-saving technique. The characteristics of infiltration irrigation material greatly affect the water use efficiency. However, little studies have focused on the material components and hydraulic conductivity. This paper was aimed at acquiring the quantitative self-adjusting water-conduction characteristics of infiltrating irrigation material (composed by montmorillonite MMT and polyacrylamide PAM) with its components and soil moisture. The Gaussian mixture model was used to simulate and calculate the relationship function of balance hydraulic conductivity of infiltrating irrigation material, component proportion and soil moisture. Infiltrating irrigation materials with 9 different ratios of components (MMT:PAM=5:1, 7.5:1, 10:1, 12.5:1, 15:1, 17.5:1, 20:1, 22.5:1, 25:1) were prepared. The material was oven-dried and condensed into solid and then ground into power  $\geq 37\mu\text{m}$ , weighed into a glass tube (diameter in 5 mm and height in 200 mm) with both ends fixed with degreasing cotton for tests. The glass tube was marked with scales. The experiment was conducted in a laboratory under different soil moisture conditions (3%, 5%, 7%, 5%, 11%, 13%, 15%, and 13%). The glass tube filled with material was immersed into soils with different moisture. There was enough water in the glass tube for water supply. The dry weight of soil placed in a beaker was about 250 g. The beakers were put into an artificial climate box with the humidity and temperature of 50% and 25°C to ensure that the soil environment did not change with the environment outside during the experiment. Water height was recorded every 2 h when the water-conductivity balance state was reached after 24 h. The data were used for establishing modes describing conductivity, components and soil moisture relationship. In addition, another materials with different component ratios (MMT:PAM=8 and 18) under 2 different soil moisture (4% and 14%) were applied for model validation. There was a total of 72 experimental points for model establishment. The Gaussian mixture model was fitted using MATLAB toolbox cftool. The results showed that the relationship between hydraulic conductivity and component ratios under different soil moisture could well fitted by Gaussian mixture model with the determination coefficient higher than 0.9 and the root mean square of error (RMSE) of 4.981-25.87 g/h. Obvious peaks were present in the fitness curves, which may reflect the interaction of material itself and soil moisture. On water balance, the material was of even swelling structure, which facilitated water conduction in materials and thus led to peaks of hydraulic conductivity. From the fitness, the model parameters could be obtained and these parameters had good exponential relationship with soil moistures with determination coefficient about 0.9 and RMSE smaller than 195 g/h. When those parameter values were used for validation, the relative errors of measured and predicted hydraulic conductivity were 0-14.14%, less than 20%. It indicated the Gaussian mixture model could well describe the relationship between hydraulic conductivity of infiltrating irrigation material, material composition and soil moisture. However, the results need to be validated in field and more studies on influential factors of hydraulic conductivity of infiltrating irrigation material should be carried out. This study has a guiding role on subsequent infiltrating irrigation material preparation and application.

**Key words:** materials; soil moisture; irrigation; infiltrating irrigation; balance hydraulic conductivity; Gaussian mixture model