

非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的扩散分析

吴 珣^{1,2}, 施建勇^{1,2}, 何 俊³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 填埋场中垃圾降解作用产生的热量在黏土衬垫中的运移会形成温度场, 温度场会对污染物的运移产生影响。文章在多孔介质热力学理论和污染物运移理论相结合的基础上, 主要考虑温度场对污染物扩散的影响, 建立了非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的一维扩散模型, 并采用分离变量法得到了模型的解析解。基于文中模型, 对比了非等温条件和等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的运移。非等温条件的黏土衬垫底部浓度比等温条件下的浓度大, 非等温模型比等温模型更偏于安全。解析解可为实验数据的拟合及分析、衬垫的设计提供参考。进一步的参数分析表明: 增大阻滞因子 R_d 和黏土厚度 L 可以减小黏土衬垫底部由温度梯度引起的有机污染物浓度。

关键词: 垃圾填埋场; 非等温; 扩散; 有机污染物; 解析解

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)03-0120-05

卫生填埋法是目前最经济、应用最广泛的处理城市固体废弃物的方法^[1]。填埋场雨水入渗、垃圾的压缩和降解会产生大量渗滤液, 渗滤液含有大量有毒有害的污染物。固体废弃物填埋场已成为地下水的一个主要的威胁, 必须对填埋场可能造成的地下水污染进行评价和模拟。

污染物在土中的运移受各种物理、化学和生物反应作用, 包括对流、弥散、扩散、吸附、溶解等。众多学者的研究指出对于施工质量控制良好的填埋场分子扩散作用在有机污染物迁移中占主导地位, 并开展了衬垫系统中有机污染物扩散问题的研究。这些研究方法^[2-5]只是从污染物运移理论方面分析, 忽略温度对污染物运移的影响。关于温度和污染物运移耦合问题, 许多学者进行了深入的研究。薛强等^[6]研究表明污染物在多孔介质中的传输过程中, 温度的改变对污染物浓度的分布起着重要的控制作用。Mamou 等^[7]对热量、浓度为常数边界以及 Dirichlet、Neumann 混合的边界条件下热量和浓度耦合运移模型进行了求解。Zhao 等^[8]采用热量和浓度运移的耦合模型, 对热量、流体和浓度在介质中的运移进行了可视化分析。

通过大量的文献调研发现大多数学者在分析温度场对污染物运移的影响时, 研究的是温度场与污染物

渗流场的耦合分析, 而分析温度场对污染物扩散场的影响较少。本文在已有研究的基础上, 以有机污染物在黏土衬垫中的扩散运移为研究对象, 考虑黏土衬垫中温度梯度对污染物扩散运移的影响。建立了非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的一维扩散模型, 并采用分离变量法对所建立模型进行解析求解。解析解可为实验数据的拟合及分析、衬垫的设计等提供参考, 提高对考虑温度影响下衬垫的防污性能的认识。

1 计算模型

1.1 热量运移模型

假设渗滤液和黏土颗粒之间的热交换是瞬时完成的, 不考虑土中温度差造成渗滤液密度不同引起的对流。计算模型见图 1。考虑热传导和热机械弥散的共同作用下, 热量在黏土衬垫中运移的控制方程为:

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: T ——土的温度;

C_e ——土体的有效热容量;

λ ——热动力弥散系数。

在初始状态下黏土衬垫中的温度为一稳定值, 则控制方程的初始条件为:

$$T(z, 0) = T_0, 0 < z < L \quad (2)$$

设上边界的温度为一稳定值, 则

$$T(0, t) = T_1, t > 0 \quad (3)$$

下边界的温度为 T_0 , 其表达式为:

$$T(L, t) = T_0, t > 0 \quad (4)$$

1.2 污染物运移模型

收稿日期: 2013-04-19; 修订日期: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172284, 51008120)

作者简介: 吴珣(1989-), 男, 博士生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。

E-mail: wuxun21@126.com

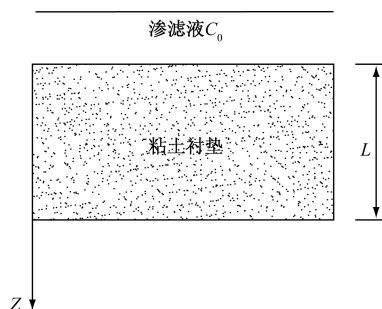


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the calculation model

假设黏土衬垫为均质饱和;对于施工质量控制良好的填埋场,土工膜可以很大程度阻止对流运移,污染物在衬垫中迁移的主要方式是分子扩散和吸附作用,忽略水力传导的作用;污染物在土中的扩散是一维的,扩散方向为 z 轴正方向;黏土对污染物的吸附作用是平衡线性吸附。基于以上假设,由扩散引起的污染物沿 z 方向的质量通量 f 为:

$$f = -n_e D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

式中: C ——有机污染物浓度;

n_e ——黏土的孔隙率;

D ——污染物的扩散系数。

由温度梯度引起的污染物沿 z 方向的质量通量 f_T 表示为:

$$f_T = -D_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (6)$$

式中: D_T ——温度梯度作用下的污染物扩散系数。

根据质量守恒,得

$$\frac{\partial(f+f_T)}{\partial z} + n_e \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

式中: S ——黏土颗粒对污染物的吸附量;

ρ ——黏土的干密度。

对于平衡线性吸附

$$S = K_d C \quad (8)$$

式中: K_d ——黏土的吸附分布系数。

将式(5)、(6)、(8)代入式(7),可得考虑温度效应污染物在黏土衬垫中的运移方程为:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \bar{D} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{D_T}{n_e} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

由于温度变化会对扩散系数产生影响,在式(9)中取平均扩散系数 $\bar{D}$ 。 R_d 为介质的阻滞因子,

$$R_d = 1 + \frac{\bar{\rho} K_d}{n_e} \quad (10)$$

由于温度变化会对土的密度和吸附分布系数产生

影响,在式(9)中取平均扩散系数 $\bar{\rho}$ 和 $\bar{K}_d$ 。

设污染物在介质中的初始浓度为0,则式(9)的初始条件为:

$$C(z, 0) = 0, 0 < z < L \quad (11)$$

渗滤液中污染物浓度假设为恒定值 C_0 ,则上边界条件为:

$$C(0, t) = C_0, t > 0 \quad (12)$$

假设衬垫的下边界为零通量边界,下边界为:

$$\frac{\partial C(L, t)}{\partial z} = 0, t > 0 \quad (13)$$

2 模型求解

2.1 热量运移模型的求解

令 $T(z, t) = W(z, t) + T_1 + \frac{1}{L}(T_0 - T_1)z$,则 $W(z, t)$

$$\text{满足} \quad C_e \frac{\partial W}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad (14)$$

具有的边界条件如下:

$$W(0, t) = 0 \quad (15)$$

$$W(L, t) = 0 \quad (16)$$

初始条件为:

$$W(z, 0) = T_0 - T_1 - \frac{1}{L}(T_0 - T_1)z \quad (17)$$

用分离变量法可得:

$$W(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} (A_i e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t}) \sin(\beta_i z) \quad (18)$$

其中

$$\beta_i = \frac{i\pi}{L}, A_i = \frac{2(T_0 - T_1)}{i\pi}$$

$$T(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} (A_i e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t}) \sin(\beta_i z) + T_1 + \frac{1}{L}(T_0 - T_1)z \quad (19)$$

2.2 污染物运移模型的求解

将式(19)代入式(9)得

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \bar{D} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + D_T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(T_0 - T_1)}{i\pi} \beta_i^2 (A_i e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t}) \sin(\beta_i z) \quad (20)$$

令 $C(z, t) = V(z, t) + C_0$,则 $V(z, t)$ 满足

$$R_d \frac{\partial V}{\partial t} = \bar{D} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + D_T \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(T_0 - T_1)}{i\pi} \beta_i^2 (A_i e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t}) \sin(\beta_i z) \quad (21)$$

具有的边界条件如下:

$$V(0, t) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial V(L, t)}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

初始条件为: $V(z, 0) = -C_0$ (24)

用分离变量法可得:

$$V(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} B_i E_{n,i} F_{n,i} \beta_i^2 (e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t} - e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t}) \sin(\gamma_n z) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4C_0}{(2n-1)\pi} e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t} \sin(\gamma_n z) \quad (25)$$

$$C(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} B_i E_{n,i} F_{n,i} \beta_i^2 (e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t} - e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t}) \sin(\gamma_n z) + C_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4C_0}{(2n-1)\pi} e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t} \sin(\gamma_n z) \quad (26)$$

其中 $\gamma_n = \frac{2n-1}{2L} \pi, B_i = \frac{4(T_0 - T_1)D_T}{i\pi LR_d n_e}$

$$E_{n,i} = \frac{2}{2i-2n+1} (-1)^{i-n} - \frac{2}{2i+2n+1} (-1)^{i+n+1}$$

$$F_{n,i} = \frac{1}{\frac{D}{R_d} \gamma_n^2 - \frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2}$$

文[10]中作者得出等温条件下污染物在黏土衬垫中扩散解析解:

$$C(z, t) = C_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4C_0}{(2n-1)\pi} e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t} \sin(\gamma_n z) \quad (27)$$

当式(26)中 D_T 趋向于 0 时,本文模型的解析解可退化到式(27),说明了本文计算模型的合理性。

3 算例分析

3.1 非等温条件与等温条件的比较

笔者根据式(26)、(27)分别计算非等温条件和等温条件下的有机污染物浓度。分析计算时采用苯作为渗滤液中有机污染物的代表。本文计算参数参照文[9]、[11]和[12],具体参数见表1。

图2比较了非等温条件和等温条件下黏土衬垫中不同深度的污染物浓度随时间的变化,等温条件采用文[10]中的解析解计算,非等温条件采用本文解析解计算。

表1 计算参数汇总

Table 1 Summary of calculation parameters

计算参数	n_e	R_d	$\bar{D}(\text{m}^2/\text{s})$	$\lambda(\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}))$	$C_e(\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$	$D_T(\text{m}^2/(\text{s} \cdot ^\circ\text{C}))$	$L(\text{m})$	$C_0(\text{mg/L})$
数值	0.54	3.24	8×10^{-10}	2.1	3×10^6	4.32×10^{-12}	1	1

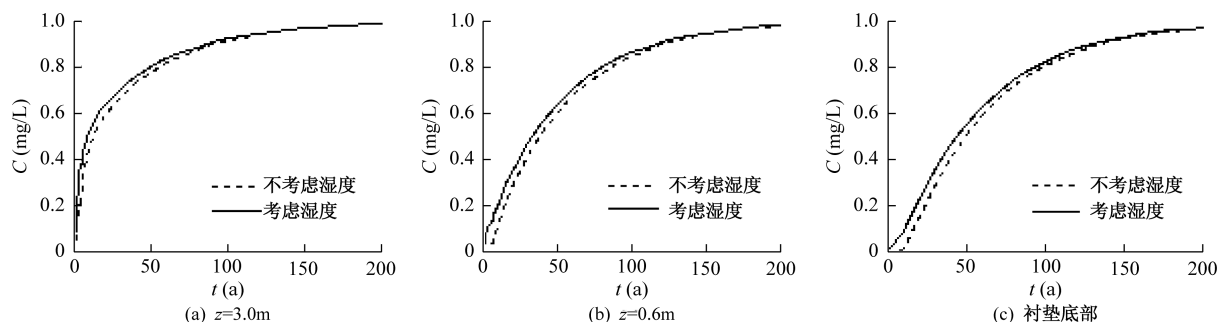


图2 非等温条件和等温条件下黏土衬垫中的污染物浓度比较

Fig.2 Comparison of concentration in the clay liner between under condition of transient temperature and under the isothermal condition

如图2所示,非等温条件和等温条件下黏土衬垫中不同深度的浓度变化趋势是相同的,并且随着时间的增大最终趋于重合。由于非等温条件和等温条件下污染物浓度分布的相似性,说明本文的模型实际地反映了污染物的运移情况。

图2中对于黏土衬垫中不同深度的有机污染物浓度,考虑温度的影响时浓度始终不小于不考虑温度影响时的浓度,即在分析黏土衬垫污染物运移时不考虑温度影响得到的结果偏小。

对比式(26)、(27)可以看出温度梯度引起的浓度增量为:

$$C_2(L, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} B_i C_{n,i} D_{n,i} \beta_i^2 (e^{-\frac{\lambda}{C_e} \beta_i^2 t} - e^{-\frac{D}{K_d} \gamma_n^2 t}) \sin(\gamma_n L) \quad (28)$$

采用表1的参数计算黏土衬垫底部由温度梯度引起的污染物浓度,其随时间变化的曲线如图3。

图3的纵轴表示由温度梯度引起的浓度 $C_2(L, t)$ 。由图可知15a时 C_2 达到最大值0.087,此时衬垫底部由温度梯度引起的苯浓度为0.087mg/L,这一浓度已超过饮用水规范中苯的极限浓度^[12],因此温度梯度引起的浓度不可忽略,在分析有机污染物运移时必须充分考虑温度的影响。黏土衬垫底部由温度引起的浓度随着时间的增大由0逐渐增大,15a后浓度随着

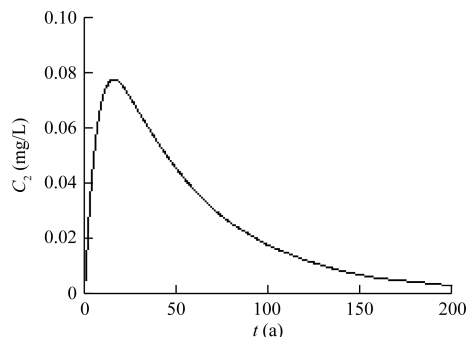


图3 温度梯度引起的黏土衬垫底部浓度随时间的变化

Fig.3 Variation in concentration at the base of clay liner caused by transient temperature with time

时间的增大而逐渐减小,最终趋向于0。这是由于随着时间的增大,黏土衬垫底部中的热量运移逐渐趋于稳定,温度梯度逐渐趋于0,从而温度梯度引起的浓度逐渐趋于0。

3.2 参数分析

黏土对污染物的吸附作用、衬垫厚度会对污染物运移产生影响。为分析参数对由温度引起的浓度的影响,分别对表1中的 R_d 和 L 进行调整,其他参数保持不变,计算结果见图4和图5。

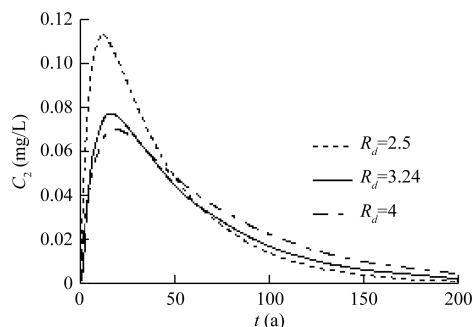


图4 R_d 对温度梯度引起的衬垫底部浓度的影响

Fig.4 Effect of R_d on concentration at the base of clay liner caused by transient temperature

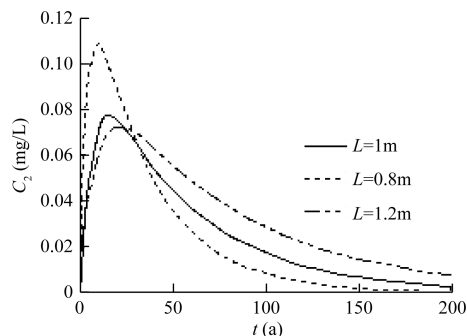


图5 L 对温度梯度引起的衬垫底部浓度的影响

Fig.5 Effect of L on concentration at the base of clay liner caused by transient temperature

由图4和图5的对比分析分别可以看出:(1)随着 R_d 的增大,由温度梯度引起的衬垫底部浓度 C_2 的最大值减小;(2)随着 L 的增大,由温度梯度引起的衬垫底部浓度 C_2 的最大值减小;因此对黏土改性以增大黏土对有机污染物的吸附作用或者增大黏土衬垫的厚度都可以明显减小由温度引起的衬垫底部浓度。

4 结论

(1)通过对非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的扩散运移分析,可以看出考虑温度效应的运移模型比等温模型更符合实际,温度对污染物运移的影响不可忽略。

(2)分析有机污染物的扩散运移时,考虑温度影响得到的黏土衬垫底部浓度大于不考虑温度影响得到的结果,更符合实际。

(3)黏土改性和增大黏土厚度对于减小由温度梯度引起的黏土衬垫底部有机污染物浓度效果显著。

参考文献:

- [1] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2011. [QIAN X D, SHI J Y, LIU X D. Modern sanitary landfill design and construction[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)]
- [2] Foose G J. Transit-time design for diffusion through composite liners [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128 (1): 590 - 601.
- [3] 陈云敏,谢海建,柯瀚,等. 层状土中污染物的一维扩散解析解[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (4): 521 - 524. [CHEN Y M, XIE H J, KE H, et al. Analytical solution of contaminant through multi-layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (4): 521 - 524. (in Chinese)]
- [4] 何俊,何世秀,胡其志. 有机污染物在完好复合衬垫中的迁移分析[J]. 岩土力学, 2009, 30 (6): 1653 - 1657. [HE J, HE S X, HU Q Z. Analysis of organic contaminant transfer through intact composite liner [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (6): 1653 - 1657. (in Chinese)]
- [5] 何俊,高子坤,詹国才. 有机污染物在复合衬垫中的运移分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36 (1): 124 - 127. [HE J, GAO Z K, ZAN G C. Transport of organic contaminants through a composite liner [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (1): 124 - 127. (in Chinese)]

- [6] 薛强,梁冰,王起新.多场耦合理论在污染物运移过程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2318-2321. [XUE Q, LIANG B, WANG Q X. Application of multi-field coupling theory to the process of contaminant transport[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(S2):2318-2321. (in Chinese)]
- [7] Mamou M. Stability analysis of thermosolutal convection in a vertical packed porous enclosure[J]. Phys Fluids, 2002,14:4302-4314.
- [8] Zhao F Y, Liu D, Tang G F. Free convection from one thermal and solute source in a confined porous medium[J]. Transp Porous Med,2007,70:407-425.
- [9] 贺玉龙.三场耦合作用相关试验及耦合强度量化研究[D].成都:西南交通大学,2003. [HE Y L. Study on relevant experiments and quantification of coupling strength for coupled thermo-hydro-mechanical behaviour of saturated rocks[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)]
- [10] Peter J C, Yu-Chao Li. Analytical Solution for Diffusion of VOCs through Composite Landfill Liners [J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2011, 137 (9): 850-854.
- [11] 苏天明,刘彤,李晓昭,等.南京地区土体热物理性质测试与分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1278-1283. [SU T M, LIU T, LI X Z, *et al.* Test and analysis of thermal properties of soil in Nanjing district [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (6): 1278-1283. (in Chinese)]
- [12] 谢海建,楼章华,陈云敏,等.污染物通过 GCL/AL 防渗层对流-弥散解析解[J].科学通报,2010,55(21):2148-2155. [XIE H J, LOU Z H, CHEN Y M, *et al.* An analytic solution to contaminant advection and dispersion through GCL/AL liner system [J]. Chinese Sci Bull, 2010,55(21):2148-2155. (in Chinese)]
- [13] GB 5749-2006 生活饮用水质量标准.北京:中国标准出版社,2006. [GB 5749-2006 Standards for Drinking Water Quality. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]

An analysis of organic contaminant diffusion through clay liner under the condition of transient temperature

WU Xun^{1,2}, SHI Jian-yong^{1,2}, HE Jun³

(1. Key Lab of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: Temperature gradient in clay liner is formed in the migration of heat which is generated by waste degradation in landfills. The contaminant migration is induced by temperature gradient. In this paper, a 1-D model for analyzing organic contaminant diffusion through clay liner under the condition of transient temperature is established on the basis of the theory of porous thermodynamics and the transportation theory. The influence by temperature gradient on organic contaminant diffusion is considered in the model. Furthermore, separation of variables is adopted to get the analytical solutions of the model. With this model, the migration of organic contaminants in clay liner under the condition of transient temperature and under the isothermal condition are compared. Concentration at the base of clay liner under the condition of transient temperature is higher than that under the isothermal condition. Thus the model under the condition of transient temperature is safer. The analytic method can be used for evaluating experimental results and design of landfill liners. Increasing the retardation factor and thickness of the clay can reduce contaminant diffusion caused by transient temperature.

Key words: landfill; transient temperature; diffusion; organic contaminant; analytic solution

责任编辑:汪美华

采用土壤孔隙表面分形维数预测土壤水分特征曲线

刘亚磊¹, 梁杏^{1,2}, 朱常坤¹, 李静¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 采用土壤颗粒体积累积曲线按照不同的粒径分级方法计算表面分形维数, 避免了原始计算过程中颗粒密度不变的假设, 改进了计算中的缺陷。结合土壤水分特征曲线分形模型—de Gennes 模型, 预测试样的 SWRC。结果发现: 不同颗粒分级只会影响表面分形维数的大小; 相同颗粒分级情况下, 计算得出的分形维数随着土壤粘粒含量降低而减小; 采用 D2 (最大半径为 1mm) 的分级情况计算出的表面分形维数, 预测得出的结果与实测值相差偏大, $RMSE \geq 2.11E-02 cm^3/cm^3$ 只适合粗略估计田间土壤的水分特征曲线; 通过 D1 (最大半径为 0.1mm) 计算出的表面分形维数, 结合 de Gennes 模型预测水分特征曲线结果与实测值非常接近, $RMSE \leq 0.0105 cm^3/cm^3$ 。研究表明采用土壤颗粒体积累积曲线计算表面分形维数, 并预测土壤水分特征曲线是合理的, 具有较高的预测精度。

关键词: 颗粒体积累积曲线; 表面分形维数; 土壤水分特征曲线 (SWRC)

中图分类号: P642.68

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)03-0125-06

分形理论是由 Mandelbrot^[1] 提出, 用来研究无规则图形以及复杂结构特征的方法。分形是度量上述土壤物理因素的一种手段, 分形维数则是其具体的表现形式^[2]。Bartoli^[3] 和 Tyler 等人^[4] 发现: 反映土壤质地和结构的物理因素, 如容重、粒径分布、孔隙度及孔隙的连通状况等, 都表现出分形特征, 这些物理因素对土壤的水力参数存在直接或者间接的影响。因此, 国内外学者^[4-7] 开展了利用土壤相关物理因素的分形维数研究土壤水力参数的工作, 并在前人的基础上不断提出新的看法与改进手段: Tyler 等^[4] 首先将分形理论成功地应用于预测土壤水分特征曲线, 提出了相应分形模型并将其扩展到三维空间。Kravchenko^[8] 对 Tyler-Wheatcraft 模型进行改进, 提出了一种根据土壤颗粒分析数据分段计算孔隙表面分形维数的方法, 并分段估计土壤水分特征曲线, 取得了较好的结果; Toledo 等^[9] 利用分形方法建立水力传导率模型; 在上述基础上, 刘建立等^[10] 由土壤颗粒质量分布曲线计算得出孔隙表面分形维数, 并利用 Burdine 模型和 Mualem 模型

预测非饱和水力传导度, 预测精度较高。分形理论的引入使得间接计算土壤水力参数多了一种简便而且准确的方法。

但是, 王国梁等^[11] 认为由不同粒径的土壤颗粒质量计算分形维数存在不合理的假设, 提出由土壤颗粒体积的大小和数量来计算体积分形维数; 杨金玲等^[12] 采用激光衍射法与吸管法实测了土壤的粒径分布, 计算并比较颗粒的质量分形维数和体积分形维数, 发现二者间存在一定的线性相关关系。随着科技的进步, 激光衍射可以快速获取土壤颗粒体积累积曲线, 独立于颗粒质量法, 可以得到土壤任意两粒径之间的体积百分含量。利用颗粒体积分布曲线计算的孔隙表面分形维数, 可以避免斯托克斯公式中不合理的假设, 探讨此法预测土壤水分特征曲线在国内相关研究中并未见报道。

本文采用土壤颗粒体积分布计算土壤孔隙表面分形维数, 结合 de Gennes 分形模型, 预测土壤水分特征曲线, 通过与实测数据的对比分析, 探讨采用土壤颗粒体积分布曲线计算表面分形维数预测土壤水分特征曲线的合理性。

1 确定表面分形维数的原理

土壤的孔隙大小分布状况对土壤的水分特征曲线有重要影响, 而孔隙表面分形维数则是描述三维空间内土壤孔隙表面不规则性的一种量度。为了确定此分维, 刘建立^[10] 等基于 Kravchenko 和 Zhang^[8] 提出的一

收稿日期: 2013-04-25; 修订日期: 2013-06-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2010CB428802); 国家自然科学基金资助项目 (41272258)

作者简介: 刘亚磊 (1987 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土壤水运动。

E-mail: ly1198745@126.com

通讯作者: 梁杏, E-mail: xliang@cug.edu.cn