

冻融期土壤温度对有机污染物迁移行为的影响

崔 嵩^{1,2}, 付 强^{1,2}, 李天霄^{1,2}, 李一凡³

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学 国际持久性有毒物质联合研究中心, 哈尔滨 150030; 3. 哈尔滨工业大学 国际持久性有毒物质联合研究中心, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为了解季节性冻融期土壤垂直分层温度变化对有机污染物迁移扩散行为的影响。通过冬季大田试验分别测定了裸地, 5, 10, 15 cm 厚度秸秆覆盖条件下 3, 10, 20, 40, 60, 100 cm 深度土壤温度, 并应用土—气交换层及相邻土壤层迁移扩散通量系数, 深入研究了土壤温度变化对有机污染物迁移行为的影响, 并系统地分析了不同温度数据对模拟结果产生的差异性。研究结果表明: 不同覆盖条件下深层土壤有机氯农药 α -HCH 迁移扩散通量系数数值的变化与土壤层厚度有关; 土壤垂直分层温度的变化与 α -HCH 的迁移扩散通量系数呈显著正相关, 且随着土壤深度的增加相关性逐渐减弱; 日平均气温变化与土—气交换层 α -HCH 的迁移扩散通量系数的变化具有明显的一致性 ($R=0.999, p=0.000$); 日平均气温与土壤垂直分层温度观测数据建立的回归方程能够较好地与 0—40 cm 土壤深度实测温度相吻合: $y=-0.788+0.818x$ (3 cm, $R=0.964, p<0.01$), $y=-1.214+0.705x$ (10 cm, $R=0.942, p<0.01$), $y=0.912+0.474x$ (20 cm, $R=0.836, p<0.01$), $y=1.004+0.361x$ (40 cm, $R=0.714, p<0.01$); 40 cm 深度土壤预测温度计算 α -HCH 迁移扩散通量系数产生的相对误差小于使用日平均气温作为替代数据的计算结果。本研究结果将可能为有机污染物在土壤中的迁移扩散行为及相关数值模拟研究提供参考价值。

关键词: 冻融期; 土壤温度; 有机污染物; 迁移行为

中图分类号: X592; S152.8

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0314-07

Effect of Soil Temperature on Migration Behavior of Organic Pollutants During Freeze-Thaw Period

CUI Song^{1,2}, FU Qiang^{1,2}, LI Tianxiao^{1,2}, LI Yifan³

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. International Joint Research Center for Persistent Toxic Substances, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. International Joint Research Center for Persistent Toxic Substances, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to understand soil effects of temperatures in different vertical layers on migration and diffusion behavior of organic pollutants during freeze-thaw period, the coefficient of migration and diffusion flux was used to assess the migration behavior of the soil-air exchange layer and adjacent soil layers. We deeply discussed the soil temperature effect on migration of organic pollutants and systematically analyzed differences on simulation results applying different temperature data. The results show that the migration and diffusion D value of α -HCH in deep soil was related with the thickness of soil layer; the soil temperatures of different vertical layers affected the migration and diffusion behavior of α -HCH; the change of diurnal average air temperature strongly affected the environmental behavior of α -HCH at soil-air exchange layer ($R=0.999, p=0.000$); the established regression equation between diurnal average air temperature and soil vertical layer temperature could well coincide with measured temperatures of different soil depths: $y=-0.788+0.818x$ (3 cm, $R=0.964, p<0.01$); $y=-1.214+0.705x$ (10 cm, $R=0.942, p<0.01$); $y=0.912+0.474x$ (20 cm, $R=0.836, p<0.01$); $y=1.004+0.361x$ (40 cm, $R=0.714, p<0.01$); The relative error of migration and diffusion D value used to predict temperature was less than using diurnal average air temperature as

收稿日期: 2015-05-17

修回日期: 2015-6-16

资助项目: 国家自然科学基金(51279031, 41401550); 黑龙江省自然科学基金(E201241); 黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z13029); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0952); 黑龙江省杰出青年基金(JC201402); 东北农业大学“青年才俊”基金(14QC49)

第一作者: 崔嵩(1981—), 男, 黑龙江宝清人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土资源环境效应及持久性有毒物质数值模拟研究。E-mail: cuisong-bq@163.com

通信作者: 付强(1973—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析和节水灌溉研究。E-mail: fuqiang 0629@126.com

surrogate data. The established regression equation applying diurnal average air temperature in this study has great significance for examining the soil temperature effects of different vertical layers on migration and diffusion behavior of organic pollutants, and can further improve and enhance the accuracy of simulation results applying multimedia environmental modeling and diffusion modeling.

Keywords: freeze-thaw period; soil temperature; organic pollutants; migration behavior

土壤因其具有相对稳定的性质而成为有机污染物在陆地生态环境系统重要的贮存场所,同时由于土壤所拥有较大的贮存能力,以及有机污染物在土壤中较长的半衰期,从而使得土壤成为有机污染物在全球范围内进行重新分配的重要主导力量^[1-3]。有机污染物在土壤中的环境监测研究虽能较好地代表监测范围内土壤的污染状况,但是限于大尺度范围内土壤样品采集的不现实性,运用多介质环境数值模型或扩散模型,进行数值模拟研究则能够很好地解决这一问题。Harner等^[4]对农药土—气交换及土壤中赋存状态的研究表明,细化土壤垂直分层能够更好地描述有机污染物的环境行为。另有研究表明,环境温度是土壤水热状况及有机污染物在土壤中残留浓度最重要的影响因素之一^[5-7]。同时有关土壤温度变化的研究多见于冻融期不同覆盖条件下^[8-10],而对有机污染物在冻融期的迁移扩散行为的研究却不多见。然而,现有的对土壤垂直分层较为全面且细化的多介质环境模型或扩散模型^[11-13],由于缺乏土壤垂直分层不同深度土壤温度的观测数据,多以日平均气温作为不同深度土壤温度的替代数据,这可能会给有机污染物土壤残留状况的数值模拟研究结果带来较大的不确定性。

基于此,本研究将以我国北方高寒地区典型城市——哈尔滨市为研究对象,测定冻融期不同覆盖条件下土壤垂直分层温度,通过土—气交换层和相邻土壤层的迁移扩散通量系数,了解土壤垂直分层温度变化对冻融期有机污染物迁移扩散行为的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究区为我国北方高寒地区典型城市——哈尔滨市,试验于2013年11月—2014年4月在东北农业大学节水灌溉试验场进行为期6个月的现场观测。试验区位于北纬45°44′24″,东经126°43′07″,属温带大陆性季风气候,冬长夏短,全年平均气温约2~4℃,冬季1月气温最低,平均气温为-19℃;夏季7月气温最高,平均气温为23℃。研究区域面积为1.0万m²,主要种植旱田作物,地表类型分别设置为裸地,5,10,15 cm 秸秆覆盖。土壤垂直层深度划分为3,10,20,40,60,100 cm,且温度采用JL—04型6

路地表温度记录仪进行自动采集。2013年11月—2014年10月日平均气温数据采用TRM-ZS1型气象生态环境监测系统自动记录。试验区土壤冻结期为11月9日—翌年3月8日,融化期为3月9日—4月28日。有机氯农药 α -HCH在我国虽已停止使用多年,但其较为活跃的物理化学性质使其易于在土壤及大气环境介质中迁移扩散,故本研究选取持久性有机污染物的典型代表 α -HCH作为目标研究对象,其物理化学参数来自于文献^[14-16]。

1.2 模型概述

有机污染物在土壤中的环境行为包括扩散、挥发、降解及渗滤等过程,而在土壤中的迁移(扩散)行为过程则由土壤—大气界面的交换及相邻土壤层之间的扩散过程构成。本文以土壤模型^[1]中涉及的有机污染物在土壤层间及土壤—大气层交换的物理过程为基础,研究有机污染物在土壤中的迁移行为。通常有机污染物在相邻土壤层之间的迁移扩散通量系数是由这两层土壤的空气和水的扩散过程组成,可由下式表示^[4]:

$$D_{v(n,n+1)} = \frac{1}{\frac{1}{(D_{a,n} + D_{w,n})} + \frac{1}{(D_{a,n+1} + D_{w,n+1})}} \quad (1)$$

式中: $n, n+1$ ——相邻的两个土壤层; $D_v, D_{v(n,n+1)}$ ——有机污染物的迁移扩散 D 值。而有机污染物在土壤交换层与大气间的迁移行为过程模块由迁移(扩散)通量系数 D_v [mol/(Pa·h)]表示^[4]:

$$D_v = \frac{1}{\frac{1}{D_e} + \frac{1}{D_a + D_w}} \quad (2)$$

$$D_a = AB_{AE}Z_a/Y_D \quad (3)$$

$$D_w = AB_{WE}Z_w/Y_D \quad (4)$$

$$D_e = AK_VZ_a \quad (5)$$

式中: D_e ——空气边界层的挥发速率系数[mol/(Pa·h)]; D_a, D_w ——土壤中空气和水的扩散速率系数[mol/(Pa·h)]; A ——研究区域面积(m²); K_V ——边界层质量迁移系数(m/h), $K_V = B_A/0.00475$; B_{AE} ——土壤中空气的有效扩散系数(m²/h); B_{WE} ——土壤中水的有效扩散系数(m²/h); Y_D ——土壤的对数平均扩散距离(m),可由 $(d_l - d_u)/\ln(d_l/d_u)$ 计算得出, d_l 和 d_u ——下层和上层土壤深度; Z_a, Z_w ——有机污

染物在大气和土壤中的逸度容量 $[\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})]$ 。

进而利用 Millington-Quirk 方程计算出土壤中空气和水的扩散系数 B_{AE} 和 B_{WE} ：

$$B_{\text{AE}} = \frac{B_{\text{A}} f_{\text{sa}}^{10/3}}{(f_{\text{sa}} + f_{\text{sw}})^2} \quad (6)$$

$$B_{\text{WE}} = \frac{B_{\text{W}} f_{\text{sw}}}{(f_{\text{sa}} + f_{\text{sw}})^2} \quad (7)$$

式中： f_{sa} 、 f_{sw} ——土壤中空气和水的体积分数。

空气分子扩散系数 B_{A} (m^2/h) 和水相分子扩散系数 B_{W} (m^2/h) 可以用下式计算^[18-20]：

$$B_{\text{A}} = \frac{0.36 \times 10^{-3} T^{1.75} (1/M_{\text{a}} + 1/M)^{0.5}}{P(V_{\text{a}}^{1/3} + V_{\text{m}}^{1/3})^2} \quad (8)$$

$$B_{\text{W}} = \frac{4.77 \times 10^{-5}}{\mu^{1.14} V_{\text{m}}^{0.589}} \quad (9)$$

式中： T ——绝对温度(K)； M_{a} ——空气的摩尔质量(g/mol)； M ——模拟化合物的摩尔质量(g/mol)； P ——大气压(1 atm)； V_{a} ——空气的摩尔体积(cm^3/mol)； V_{m} ——模拟化合物的摩尔体积(cm^3/mol)； μ ——水的粘度系数。

1.3 模拟试验方案设计

有机污染物在大气和土壤中的环境过程包括大气向土壤的干湿沉降、雨水淋洗和扩散过程，土壤向大气的挥发(扩散)过程，土壤层间扩散、渗滤和径流过程，以及有机污染物在大气和土壤中的降解行为，可以说有机污染物在土壤中的环境行为是比较复杂的，所有这些环境过程构成了有机污染物在大气—土壤及不同土壤层间的迁移转化行为。已有研究表明不同土壤类型(旱田、水田、林地、草地、荒地和城市土壤)的含水和含气体积分数及土壤有机质质量分数均会对有机污染物的迁移扩散行为产生影响^[13,21]。因研究期间处于温度相对较低的冬季，而 α -HCH 作为有机氯农药类化学品，在土壤中主要通过微生物的降解动力学过程来进行转化的行为相对较弱，因此在不考虑 α -HCH 大气和土壤中化学过程，同时假定土壤有机质、土壤无机质、土壤水和气的体积分数一定的情况下，单纯从其物理过程即迁移(扩散)行为的角度，通过扩散 D 值来分析土壤垂直分层温度的变化对旱田土壤 α -HCH 迁移扩散行为的影响。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖条件下温度对 α -HCH 迁移行为的影响分析

2.1.1 不同覆盖条件下土壤温度对土壤垂直分层 α -HCH 迁移行为的影响 由图 1 可知，在不考虑地表覆盖类型的情况下， α -HCH 的迁移扩散 D 值随着土壤深度的增加呈现递减的趋势，且 3 cm 和 100 cm

深度相差近两个数量级，而这种差异则随着土壤深度的增加逐渐减小，这可能受土壤对数平均扩散距离(Y_{D})的影响， Y_{D} 与土壤层厚度有关，随着土壤层厚度的增加而增大，从而导致土壤中空气和水的扩散速率系数减小，进而会使 α -HCH 迁移扩散 D 值变小。然而，将考虑的 6 种土壤垂直分层的 Y_{D} 值与 α -HCH 的迁移扩散 D 值作相关性分析发现，二者之间并没有统计学意义上的相关性；而将 20, 40, 60, 100 cm 深度的 Y_{D} 值与迁移扩散 D 值作相关性分析则表明，二者之间存在显著负相关， $R = -0.962$ ， $p < 0.05$ ，这说明土壤对数平均扩散距离对 20—100 cm 深度土壤 α -HCH 的迁移扩散行为具有影响，同时从迁移扩散 D 值的数值变化来看，这种差异性会随着土壤深度的增加而减小。

秸秆覆盖相对于裸地来说，对土壤温度的变化具有双向作用，即试验初期当温度下降时秸秆覆盖能够阻止土壤热量的散失，而试验末期当温度上升时也会影响太阳辐射和气温对土壤温度的传递。由图 1 可以看出，裸地土壤垂直分层 α -HCH 迁移扩散 D 值随温度变化的波动最大且随着土壤深度的增加波动振幅逐渐减弱；对于 10 cm 和 15 cm 秸秆覆盖，不同深度土壤 α -HCH 的迁移扩散 D 值变化基本一致且振幅较小；裸地不同深度土壤 α -HCH 迁移扩散 D 值的变化则较大；同时与裸地相比，所有覆盖类型 α -HCH 的迁移扩散 D 值的变化由浅层土壤(3, 10, 20 cm)至深层土壤(40, 60, 100 cm)随相应土壤深度温度的变化均逐渐趋于平稳，且这种变化存在明显的滞后效应，即当试验期间日平均气温由下降到上升期间，在秸秆覆盖条件下， α -HCH 的迁移扩散 D 值随着土壤深度的增加，受温度变化影响而减小或增大的趋势逐渐变缓，即由于秸秆覆盖的存在，冻结期 α -HCH 迁移扩散 D 值高于裸地，而融化期(除 100 cm 深度外)则呈现相反状态。为进一步探寻土壤垂直分层温度与迁移扩散 D 值的关系，将裸地 3, 10, 20, 40, 60, 100 cm 深度土壤温度分别与相应层的迁移扩散 D 值作相关性分析得到，其相关系数分别为： $R = 0.851$ ； $R = 0.882$ ； $R = 0.943$ ； $R = 0.977$ ； $R = 0.987$ ； $R = 0.956$ ，且均在 0.01 水平上显著相关。由此可知，不同覆盖条件下，深层土壤 α -HCH 迁移扩散 D 值数值的变化与土壤层厚度有关，而迁移扩散 D 值曲线变化的波动振幅则与温度的变化有关，同时土壤垂直分层温度将会影响迁移扩散 D 值的变化，与裸地相比不同秸秆覆盖厚度会使迁移扩散 D 值曲线的变化相对平稳且在冻结期高于裸地的迁移扩散 D 值。

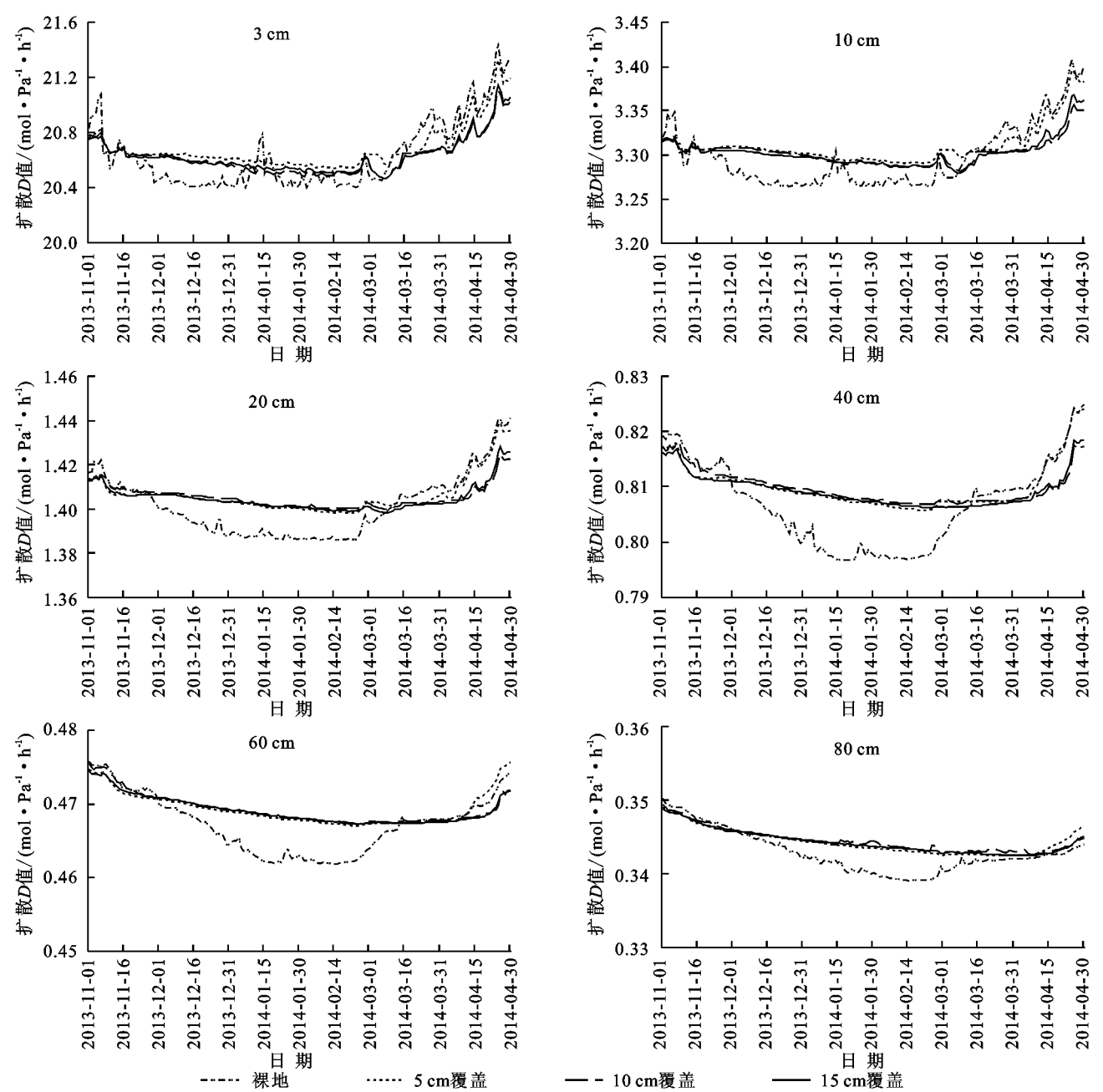


图 1 不同覆盖条件下土壤垂直分层扩散 D 值随时间的变化特征

2.1.2 日平均温度变化对土—气交换层 α -HCH 环境行为的影响分析 为了多介质环境数值模型模拟有机污染物环境行为研究的需要,通常将土壤垂直分层划分为交换层(深度 0.1 cm)、缓冲层(深度 1 cm)、耕作层(深度 20 cm)和贮蓄层(深度 30 cm),而土壤交换层则主要是用于描述模拟有机污染物在界面交换时的过渡过程。

因秸秆覆盖对土壤热量的传递和散失有阻滞作用,且由于覆盖层的存在也会阻碍污染物在大气与土壤交换层之间的迁移扩散行为,故选取裸地来研究污染物的迁移扩散行为。由图 2 和图 1 比较可知,土壤交换层的迁移扩散 D 值高出 3~100 cm 土壤深度约 1~3 个数量级,这表明土壤交换层对有机污染物的土—气交换及

土壤垂直分层中有机污染物迁移扩散行为均具有重要的影响,即为了保持平衡状态,当污染物的大气浓度高于土壤浓度时,其环境行为会表现为通过土壤交换层向下层土壤进行垂直迁移,而当大气浓度低于土壤浓度时深层土壤中的污染物会通过扩散行为对土壤交换层进行补给。通过 2013 年 11 月—2014 年 10 月裸地土壤交换层迁移扩散 D 值与日平均气温的相关性分析得到,二者之间具有显著相关性, $R=0.999$, $p=0.000$,随着温度升高会增大 α -HCH 的迁移扩散 D 值,每 1°C 温度的变化可以引起 α -HCH 迁移扩散 D 值的变化量为 $0.55 \text{ mol}/(\text{Pa} \cdot \text{h})$ 。进一步探讨日温度变化对 α -HCH 迁移扩散 D 值的影响,由图 3 可以看出,2013 年 11 月 1 日 0—24 时,二者之

间的变化具有明显的一致性($R=1.000, p=0.000$), 温度在 $-1.4\sim 10.9^{\circ}\text{C}$ 范围可以引起 $\alpha\text{-HCH}$ 迁移扩散 D 值在 $188.07\sim 194.93\text{ mol}/(\text{Pa}\cdot\text{h})$ 之间变化, 即每 1°C 温度的变化可以引起 $\alpha\text{-HCH}$ 迁移扩散 D 值的变化量为 $0.56\text{ mol}/(\text{Pa}\cdot\text{h})$ 。由此可知, 日平均气温的变化将会强烈影响土—气交换层 $\alpha\text{-HCH}$ 的环境行为。

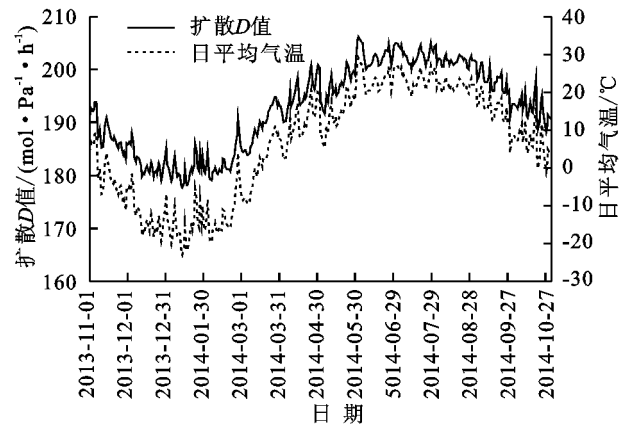


图 2 日平均气温与土—气交换层扩散 D 值的关系

2.2 日平均气温变化对土壤垂直分层温度的影响

土壤垂直分层由于温度的差异性会对 $\alpha\text{-HCH}$ 的迁移扩散 D 值的变化产生影响。与裸地相比, 3 种秸秆覆盖条件下的 $\alpha\text{-HCH}$ 迁移扩散 D 值的波动均

较为平稳, 裸地土壤因与大气环境直接接触而受环境温度变化的影响较为剧烈, 从而会引起 $\alpha\text{-HCH}$ 的迁移扩散 D 值的强烈波动。为了进一步探寻日平均气温对土壤垂直分层温度变化的影响, 将试验期日平均气温与观测获取的不同土壤深度的温度以及相邻土壤层间的温度数据进行相关性分析, 试图获得二者之间是否存在必然的联系。由表 1 可以看出, 除 100 cm 深度的土壤温度外, 其他深度土壤与日平均气温之间均存在显著正相关关系, 且相关系数随着土壤深度的增加逐渐降低。然而, 在相邻土壤层间土壤温度则具有较高的相关程度, 这表明相邻土壤层间存在较强烈的温度传递关系, 而大气环境温度的传递作用则随着土壤深度的增加明显减弱。

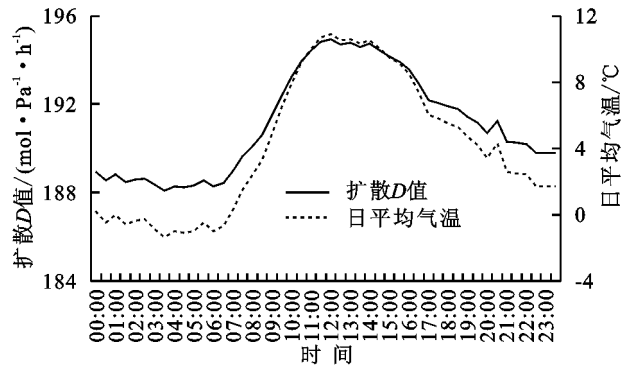


图 3 2013 年 11 月 9 日环境温度变化与扩散 D 值

表 1 日平均气温与不同土壤深度温度的相关系数

日平均气温		土壤分层温度					
		3 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	100 cm
日平均气温	1.000						
3 cm	0.964**	1.000					
10 cm	0.942**	0.994**	1.000				
20 cm	0.836**	0.929**	0.955**	1.000			
40 cm	0.714**	0.832**	0.872**	0.962**	1.000		
60 cm	0.578**	0.709**	0.756**	0.893**	0.967**	1.000	
100 cm	0.020	0.135*	0.202**	0.415**	0.608**	0.765**	1.000

注: ** 表示 $p<0.01$, * 表示 $p<0.05$ 。

在研究有机污染物在土壤中迁移扩散行为时, 由于实际观测数据的缺失, 往往忽略土壤垂直分层温度的差异, 而以日平均气温作为不同深度土壤温度的替代数据, 这将可能会增加有机污染物土壤残留浓度的模拟预测结果的不确定性。

为此, 本研究试图通过日平均气温与模型研究需要的土壤垂直分层 3, 10, 20, 40 cm 深度温度的相关关系建立预测模型, 将日平均气温(变化范围 $-23.11\sim 20.85^{\circ}\text{C}$)作为自变量, 分别与其作回归分析得到预测方程:

$$y=-0.788+0.818x\text{ (3 cm, }R=0.964, p<0.01\text{)}$$
(10)

$$y=-1.214+0.705x\text{ (10 cm, }R=0.942, p<0.01\text{)}$$
(11)

$$y=0.912+0.474x\text{ (20 cm, }R=0.836, p<0.01\text{)}$$
(12)

$$y=1.004+0.361x\text{ (40 cm, }R=0.714, p<0.01\text{)}$$
(13)

根据预测方程计算不同深度土壤温度的预测值, 与实际观测值进行对比分析(图 4)可以看出, 由日平均气温得到的预测值与实际观测值基本吻合, 并能反映出不同深度土壤温度随环境温度的变化趋势, 而 40 cm 土壤深度的预测值与实际观测值略有偏差, 但也处于实际观测最大值与最小值区间范围之内, 这表明本研究根据日平均气温建立的回归方程能够较好地反映不同深度土壤温度的变化情况, 可以为考虑北方高寒地区土壤垂直分层温度变化条件下的多介质环境数值模拟模型的构建及优化提供一定参考价值。

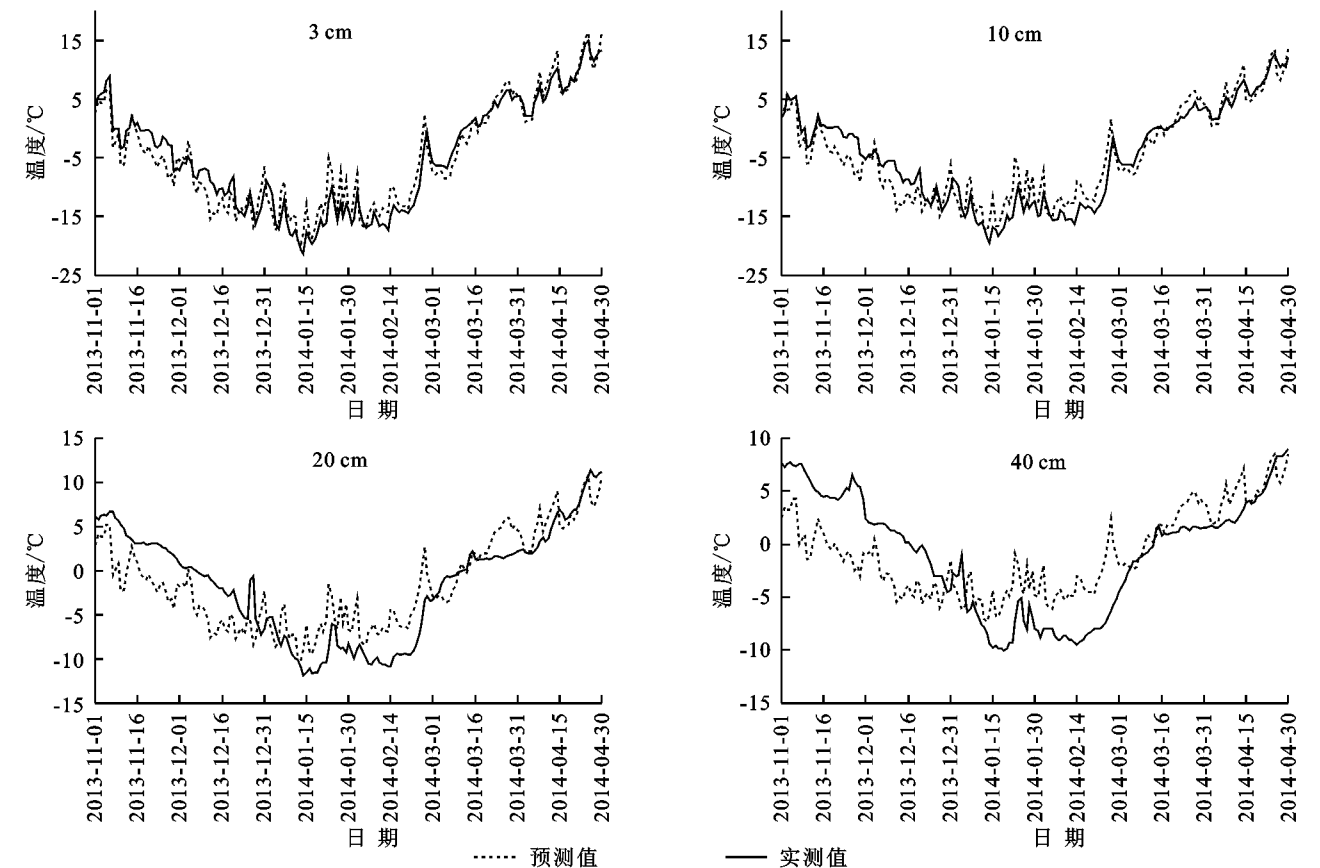


图 4 土壤实测温度与预测温度对比

2.3 不同温度数据对 40 cm 土壤深度 α -HCH 迁移行为的差异性分析

由图 4 可知,40 cm 土壤深度温度预测值与实测值的偏差略大,为进一步验证这种偏差对 α -HCH 迁移扩散行为带来的影响,本研究将分别用 40 cm 深度土壤温度的实测值、预测值与日平均气温来计算该深度 α -HCH 的迁移扩散 D 值,结果如图 5 所示。应用实测与预测温度值计算 40 cm 土壤深度 α -HCH 的迁移扩散 D 值基本一致,而应用日平均气温作为替代数据的计算值则存在强烈的波动,这表明根据日平均气温预测的 40 cm 土壤深度的温度数值能够较好地用于 α -HCH 迁移扩散 D 值的计算。为了能够更为直观地体现出日平均气温、40 cm 深度预测土壤温度、40 cm 深度实测土壤温度对 α -HCH 的迁移扩散行为的差异性,分别计算预测温度与日平均气温对真实结果的相对误差。

由图 6 可以看出,应用预测温度计算的 α -HCH 迁移扩散 D 值的误差要远小于应用日平均气温计算的误差。通常模型模拟的运行周期一般长达几年甚至几十年,这种误差也将会逐步放大,进而会对污染物土壤残留状况数值模拟结果的准确性产生较大的影响。由此说明,根据日平均气温预测不同深度土壤温度可以进一步应用到北方高寒区有机污染物迁移

行为的数值模拟研究中,且具有一定的可靠性。

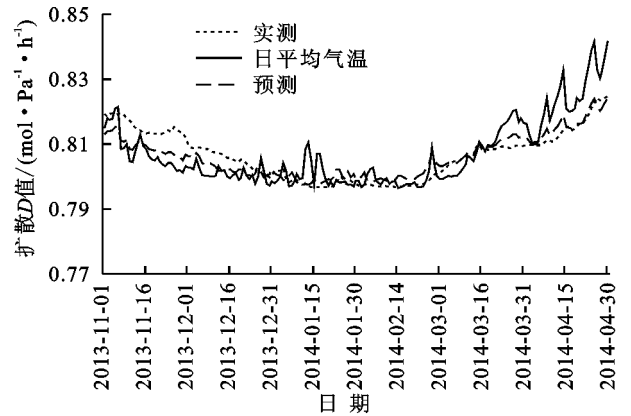


图 5 不同温度数据计算的 40 cm 土壤深度扩散 D 值

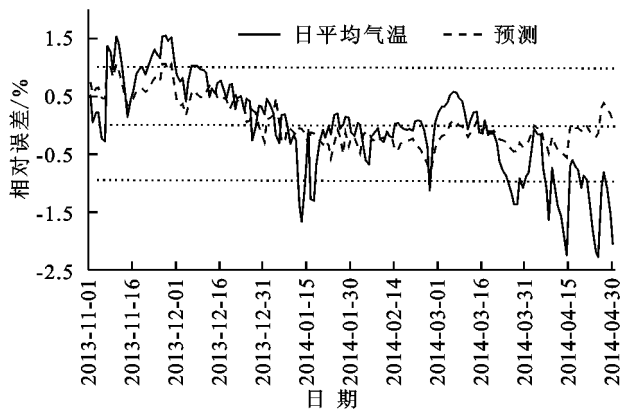


图 6 日平均气温与预测温度对实际扩散 D 值的相对误差

3 结论

(1) 不同覆盖条件下,土壤垂直分层深层土壤 α -HCH迁移扩散 D 值数值的变化与土壤层厚度有关,土壤垂直分层温度的变化与 α -HCH的迁移扩散通量系数呈显著正相关,且随着土壤深度的增加相关性逐渐减弱。在冻结期秸秆覆盖会使 α -HCH迁移扩散 D 值大于裸地,且变化相对平稳,而融化期(除100 cm土壤深度外)则呈相反趋势。

(2) 日平均气温的变化将会强烈影响土—气交换层 α -HCH的环境行为,温度每 1°C 的变化可以引起 α -HCH的迁移扩散 D 值的变化量约为 $0.56\text{ mol}/(\text{Pa}\cdot\text{h})$ 。

(3) 日平均气温会影响土壤垂直分层温度的变化,以日平均气温作为自变量分别与模拟研究需要的土壤垂直分层温度观测数据作回归分析得到预测方程,能够较好地与不同土壤层的实测温度吻合。本研究虽具有一定的局限性,但通过研究可以证实土壤垂直分层温度的变化将会影响有机污染物的迁移扩散行为。

(4) 本研究根据日平均气温建立的回归方程可以为北方高寒地区有机污染物在土壤中的迁移扩散行为研究提供一定的参考价值。通过对旱田土壤垂直分层温度变化对有机污染物迁移扩散行为的研究也可为进一步对不同土壤类型(水田、草地、林地、城市土壤及荒地等)垂直分层土壤温度的观测试验,以及相应土壤类型有机污染物的迁移扩散行为的研究提供借鉴。

参考文献:

- [1] Mackay D. Multimedia environmental models: the fugacity approach[M]. Boca Raton: CRC Press,2001.
- [2] Wang X, Sheng J, Gong P, et al. Persistent organic pollutants in the Tibetan surface soil: spatial distribution, air-soil exchange and implications for global cycling[J]. Environmental Pollution,2012,170(8):145-151.
- [3] Liu X, Ming L L, Nizzetto L, et al. Critical evaluation of a new passive exchange-meter for assessing multimedia fate of persistent organic pollutants at the air-soil interface[J]. Environmental Pollution, 2013,181(6):144-150.
- [4] Harner T, Bidleman T F, Jantunen L M M, et al. Soil-air exchange model of persistent pesticides in the United States cotton belt[J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2001,20(7):1612-1621.
- [5] Tripathi V, Abhilash P C, Singh H B, et al. Effect of temperature variation on lindane dissipation and microbial activity in soil[J]. Ecological Engineering,2015,79:54-59.
- [6] 何汇虹,刘文兆.黄土塬区农田土壤温度变化特征研究[J].水土保持研究,2013,20(5):124-128.
- [7] Zhang Q Q, Ying G G, Chen Z F, et al. Multimedia fate modeling and risk assessment of a commonly used azole fungicide climbazole at the river basin scale in China[J]. Science of the Total Environment,2015,520:39-48.
- [8] 陈军锋,郑秀清,秦作栋,等.冻融期秸秆覆盖量对土壤剖面水热时空变化的影响[J].农业工程学报,2013,29(20):102-110.
- [9] 胡铭,刘志辉,陈凯,等.雪盖影响下季节性冻土消融期的土壤温度特征分析[J].水土保持研究,2013,20(3):39-43.
- [10] 邢述彦,刘虎,郑秀清,等.秸秆覆盖厚度对冻融期土壤温度的影响[J].太原理工大学学报,2013,43(6):741-744.
- [11] Ma J, Daggupaty S, Harner T, et al. Impacts of lindane usage in the Canadian prairies on the Great Lakes ecosystem. 1. Coupled atmospheric transport model and modeled concentrations in air and soil[J]. Environmental Science & Technology,2003,37(17):3774-3781.
- [12] Tian C, Liu L, Ma J, et al. Modeling redistribution of α -HCH in Chinese soil induced by environment factors[J]. Environmental Pollution, 2011,159(10):2961-2967.
- [13] 崔嵩,杨萌,李一凡.不同土壤类型多氯联苯土壤残留特征变化分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(6):1880-1888.
- [14] Zhang N, Yang Y, Liu Y, et al. Determination of octanol-air partition coefficients and supercooled liquid vapor pressures of organochlorine pesticides[J]. Journal of Environmental Science and Health Part B,2009,44(7):649-656.
- [15] Mackay D, Shiu W, Ma K. Physical-chemical properties and environmental fate handbook [CD]. Boca Raton: CRC Press,1999.
- [16] Shoeib M, Harner T. Using measured octanol-air partition coefficients to explain environmental partitioning of organochlorine pesticides[J]. Environmental Toxicology and Chemistry,2002,21(5):984-990.
- [17] Jury W A, Spencer W F, Farmer W J. Behavior assessment model for trace organics in soil: I. Model description[J]. Journal of Environmental Quality,1983,12(4):558-564.
- [18] Schwarzenbach R P, Gschwend P M, Imboden D M. Environmental Organic Chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons Inc.,2003.
- [19] Hayduk W, Laudie H. Prediction of diffusion coefficients for nonelectrolytes in dilute aqueous solutions[J]. AIChE Journal, 1974,20(3):611-615.
- [20] Severinsen M, Jager T. Modelling the influence of terrestrial vegetation on the environmental fate of xenobiotics[J]. Chemosphere,1998,37(1):41-62.
- [21] 崔嵩,刘丽艳,李一凡.土壤有机质影响多氯联苯土壤残留变化特征[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(11):4759-4767.