研究报告

污染物在下包气带非饱水条件下 迁移转化的研究*

聂永丰 刘兆昌 李亚东 (清华大学环境工程研究所)

一、前 言

城市污水施于农田,其中的污染物可能 潜入地下水中造成危害,为了控制这种现象 的发生,有必要开展污染物在地下包括下包 气带的迁移转化规律研究,以供制订有关标 准的依据.

污染物在土层中的迁移转化规律与土壤 水的流动状况、土壤的吸附交换性能以及污 染物的类型有密切相关性。 而土层有 耕 作 层、犁底层和下包气带层之分,前两者的饱和 导水率较小,经常处于饱水态;后者的孔隙只 有一部分为水所占有,尚有一部分仍充满空 气,系处于非饱和(即非饱水)状态,污染物在 此层中的迁移转化,受土壤含水率影响,其规 律性远比饱和的情况复杂.

近年来,国外对污染物在非饱和土层中 的迁移转化规律研究十分重视,取得肯定的 进展,但仍有不少问题有待深人进行。我们 在科委下达的"华北地区城市污水回用于农 田灌溉"攻关课题研究中,对重金属污染物在 下包气带非饱和土层中的迁移转化规律进行 探讨性研究。

二、基本理论

污染物在非饱和土层中的迁移转化,主 要是土壤水运移及污染物质与土壤间各种物 理化学作用所致。考虑推流、弥散和吸附解 吸作用、则污染物在下包气带土层中垂向迁 移的基本方程为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial(\theta C)}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qC)}{\partial z} - \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial S}{\partial t}$$
(1)

式中: C和S分别为污染物在水和土壤中的 浓度、θ为土壤体积含水率、 ρ_b 为土壤干容 重、9为水流通量、D为弥散系数、t为时间、 z为垂向坐标(向下为正).

在稳定条件下, **9**和θ不变. 当污染物 浓度较低时,其吸附符合 Henry 模式: S = KdC,当分配系数 Kd 不变时,(1)式可简化 为:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \qquad (2)$$

式中 v 是土壤水运移速度, R 为污染物在下 包气带土层中的滞留因子,分别定义为:

$$y = \frac{q}{\theta} \tag{3}$$

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K d \qquad (+)$$

(1) 式适用于任何边界条件和初始条件 下污染物在下包气带的迁移转化,但必须用 数值方法求解.(2) 式可用数值或解析方法 求解.通过求解式(1)或(2),可得污染物在

^{*} 本课题还得到国家自然科学基金资助。

• 3 •

所给边界条件和初始条件下在下包气带中浓度的时空分布。而在下包气带土层中的迁移速度 v. 和经过厚度为L的土层所需迁移时间 T.则可通过土壤水运移速度 v 和污染物在该土层中的滞留因子R确定:

$$\nu_{\epsilon} = \frac{\nu}{R} = \frac{q}{\theta R} \tag{5}$$

$$T_{\epsilon} = \frac{L}{\nu_{\epsilon}} = \frac{L\theta R}{q} \tag{6}$$

三、耕作层、犁底层和下包气 带透水性能研究

通过下包气带的水流通量 q,取决于包 气带土层中透水性能最弱土层的饱和导水率 数值。包气带土层构造,按耕作土剖面由上 而下可分为耕作层、犁底层和下包气带。华 北地区耕作层一般厚 20-30 厘米,疏松多 孔;犁底层厚 6-8 厘米,呈片状结构,致密, 有明显水平层理,孔隙度小但毛管空隙多;下 包气带又分为心土层和底土层,心土层厚 20-30 厘米,有不同沉积现象、结构比较紧 密,底土层一般位于地表 50-60 厘米以下. 为了确定下包气带水通量 q,我们在多年污 灌的北京通县双桥地区稻田和大兴县大红门 地区稻田和菜田中,取样分别测量了耕作层、 犁底层和下包气带的透水能力.

1. 取样方法

用直径 10 厘米、高 10 厘米的环刀,在取 样点按相应深度,垂直压入土中取原状土样; 取样深度分别为:耕作层 5-15 厘米、犁底 层 20-30 厘米、下包气带 30-40 厘米.取 样时间为 1987 年 11 月,即水稻和蔬菜刚收 割之后.样品共 10 组,每组 3 个样."稻 I" 和"稻 II"分别取自双桥二稻田,"稻 III"和 "菜 I"分别取自大红门外稻田和菜地;下标 1、2、3 表示不同取样点;A、B、C 分别代表 耕作层、犁底层和下包气带.

2. 试验内容及结果

测定了影响土壤透水能力的土壤容重和 颗粒组分分析,以及土壤透水性能的综合指 标----土壤饱和导水率.饱和导水率用DK-1 型土壤渗透仪测量,容重和颗粒组分分析分 别用环刀法和比重法测出.主要试验结果见 表 1.

(1) 除菜 I, 犁底层的饱和导水率稍大 于下包气带饱和导水率外,其余9组犁底层 的饱和导水率均小于相对应的耕作层和下包 气带的饱和导水率.双桥地区二稻田(5组 土样)耕作层、犁底层和下包气带的平均饱和 导水率分别为2.357、0.117和1.298cm/d,犁 底层的饱和导水率是耕作层的1/20和下包 气带的1/11;大红门地区稻田和菜地(5组土

	组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
参数 层次		稻 I,	稻 I,	稻 I,	稻 II,	稻 II,	稻 III,	稻Ш,	稻 Ш,	菜 I,	葉 I,
容重	А	1.600	1.065	1.237	1.152	1.207	1.118	1.117	1.023	0.898	0.975
√克/厘米³)	в	1.453	1.414	1.486	1.556	1.553	1.469	1.453	1.304	1.165	1.329
	С	1.297	1.624	1.473	1.306	1.441	1.363	1.317	1.451	1.329	1.428
不均匀系数 (%)	A	19.1	20.9	23.0	27.3	22.8	14.7	8.1	8.3	3.0	3.2
	В	26.7	22.2	24.3	45.0	70.0	8.1	8.6	8.5	7.6	7.3
	С	25.5	18.3	21.0	25.0	25.0	3.4	3.3	4.0	6.8	7.7
饱和导水率 (A	0.492	0.380	1.414	3.175	6.594	0.311	4.003	2.712	0.729	0.324
	В	0.070	0.254	0.040	0.162	0.059	0.177	0.082	0.106	0.311	0.077
	с	0.298	0.861	0.852	2.140	1.329	0.864	0.406	0.284	0.247	0.319

豪1 耕作层、犁底层和下包气带土层透水试验结果

苔)耕作层、犁底层和下包气带的平均饱和导水率则分别为1.616,0.151和0.424cm/d,犁 底层的饱和导水率是耕作层的1/11和下包 气带的1/3.

(2)除第一组耕作层反常外,其余9组 耕作层容重均小于犁底层和下包气带容重. 这说明耕作层总孔隙度大,疏松,导致其具有 较强的导水性能.

(3) 从颗分结果看,30 个土样除个别属 砂土外、其余均属亚砂土;有 8 组犁底层的不 均匀系数大于相应的耕作层和下包气带.犁 底层和下包气带土层的容重差别不明显,可 二者饱和导水系数相差较大,说明土壤的不 均匀系数对土壤的饱和导水性能有较大影响.

试验结果表明: 犁底层具有明显水平层 理、不均匀系数大、有效空隙率小、透水能力 差,其饱和导水率不但远小于耕作层,而且小 于下包气带,是决定污灌水垂直下渗通量的 控制层.

四、土壤水运移及参数测定

通过下包气带的水通量 q,与该层的非 他和导水率 $K(\theta)$ 有如下关系:

$$q = K(\theta) \left(1 - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \tag{7}$$

式中 ϕ 是土壤基质势. ϕ 和 $K(\theta)$ 均为 θ 的 函数. $K(\theta)$ 、 θ 和饱和导水率 K,及饱和含 水率 θ ,间近似存在如下关系:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\prime}$$
(8)

式中 r 为经验参数. Campbell^[2] 推荐 r = 2b + 3, b 值通过土壤水特性曲线和式 $\phi = \phi_{e}\left(\frac{\theta}{\theta_{e}}\right)$ 求出: Bresler^[11] 则认为对所有土壤, r 值可近似取为 7.2. 本文通过实验对此进行了验证.

若含水率随深度变化不大、则
$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \doteq 0$$
,

式(7)简化为:

举

$$q = K(\theta) \tag{9}$$

由式(8)和(9)可导出

$$\theta = \theta_{s} \left(\frac{q}{K_{s}}\right)^{m} \tag{10}$$

式中, m = 1/r

为确定下包气带的含水率和土壤水运移 速度,测定了华北地区下包气带典型土壤的 非饱和导水率及特性参数 *b、r* 及 *m*.

1. 测量方法:

用土壤负压计测出土壤基质势和含水率的关系、作土壤水特性曲线,通过曲线拟合 求 b 值、进而确定 r 和 m. 再测出饱和导水 率 K,和饱和含水率 θ,,便可确定非饱和导 水率. 饱和含水率通过土壤容重和比重 求 出.

2. 测量结果

图1给出、亚粘土、亚砂土、粉砂土的土 壤水特征曲线.根据各种土壤测定特征曲线 求出的 b、r及m值列于表2.表中还列入了 这些土壤的干容重、饱和含水率和饱和导水 率测定值.

按 Bresler 的结论,这几种土壤的 r -



表 2 华北地区典型土壤参数测定数据

土质 参 次	粘土	亚粘土	亚砂土	粉砂土
容重(g/cm ³)	1.34	1.32	1.32	1.60
饱和含水率(cm³/cm)	0.50	0.51	0.51	0.41
饱和导水率 (cm/h)	0.294	0.798	1.077	1.643
Ь	2.91	2.60	2.54	1.25
r	8.82	8.20	8.12	5.50
m	0.113	0.122	0.123	0.182

7.2, *m* = 0.139, 其值与按 Campbell 法测定 结果有较大差别.将所测出的 *K*, *r* 和*m* 值 代人式(8)和(9),便可得到非饱和导水率和 含水率的计算公式.

3. 结果检验

为检验用 Campbell 法和 Bresler 法确 定的,及m数值的可靠性,用上渗瞬时剖面 法实测了不同含水率时亚粘土的非饱和导水 率.实测 $K(\theta) \sim \theta$ 曲线拟合的数学表达式 如下

$$K(\theta) = \begin{cases} 1.624(\theta/0.51)^{10.73} \text{ (cm/h)} \\ 0.027(\theta/0.51)^{2.57} \text{ (cm/h)} \end{cases}$$
(10)

用 Campbell 法确定的表达式为:

 $K(\theta) = 0.798(\theta/0.51)^{8.2}$ (cm/h) (11) 而根据 Bresler 法,则

$$K(\theta) = 0.798(\theta/0.51)^{7.2} (cm/h)$$
 (12)





图 2 比较了各种方法的结果。拟合曲线 一般与实测值符合较好,但在含水率高时与 实测值偏差较大。 Campbell 法与实测值的 符合较拟合曲线差,但仍能较好地反映 $K(\theta)$ 和 θ 的关系,且在含水率高时比拟合曲线更 符合实际情况,这说明用 Campbell 法确定的 r 及m 值是可靠的。 Bresler 法与实测值的 偏差比 Campbell 法大,但仍能近似反映出 $K(\theta) \sim \theta$ 关系。Campbell 法和 Bresler 法 对饱和导水率 K,的敏感性远比 r 和m 强。在 污灌条件下,只要 K,的数值可靠,用 r =7.2、m = 0.139 来确定下包气带的非饱和导 水率和含水率简便易行,具有较大实用价值。

五、非饱和迁移模拟实验

在稳定水流条件下进行了污染物在非饱和土层和饱和土层中迁移转化的模拟实验. 实验土质为亚粘土,污染物用放射性氚代表.

1. 实验方法

非饱和土柱高 14 厘米、内径 6.2 厘米、内 壁刻有若干环形槽防止水沿柱壁产生 沟流, 柱侧开有透气孔以维持介质内有气体 存 在. 柱上端有一厚 0.4 厘米的微孔陶土板与柱 内 土壤紧密接触,其透水性能较差,功能与犁 底层相同,起隔气通水作用,以维持柱内处于 非饱和状态. 柱下端为多孔垫板. 在垫板下 施加合适负压,可以从非饱和土柱中取出水 样并控制土层含水率至需要数值. 在加入氚 水前用二倍柱容积自来水洗柱,然后加入比 活度为 1 × 10⁻⁶Ci/L 的氚水 302ml,以后换 加自来水,并开时取样分析. 根据实验数据, 用解迁移方程逆问题法求迁移参数 R、D、v和弥散度 $\alpha(\alpha = D/v)$.

饱和土柱几何形状、土壤装填密度和实 验和数据处理方法与非饱和柱相同,但顶端 无陶土板.

2. 实验结果

图 3 和 4 给出氚弥散实验结果.由实验 数据解逆问题求出的 *R*、D 和 ν、α 列于表



表 3 氚弥散实验结果

水流状况	θ (cm ³ / cm ³)	R	v(m/ d)	<i>D</i> (m ² /d)	α(m)
非饱和 饱和	0.313 0.50	1 I	0.0412	2.96×10-4 6.9×10-4	0.0072

3,与之相应的拟合曲线见图 3 和 4.

实验结果表明: 氚的滞留因子在饱和及 非饱和土层中相同,但弥散系数D和弥散度 α 有密切关系,其值随含水率减小而降低.

3. 迁移参数合理性分析

因氚水性质与水相同,故其 Kd = 0, R 应为 1,这与拟合曲线得出的R值一致.由 非饱和氚弥散曲线峰值出现时间和柱长算出 土壤水的运移速度为 0.172cm/h, 这与拟 合曲线确定的 v = 0.171 cm/h 也相符. 由 该柱水通量 q = 0.054 厘米/时和v值求出 柱的平均含水率为 0.313cm³/cm³. 柱上部负 压为-177cm 水柱,下部为-354cm 水柱,由 达西定律(式 7)求出对应的 $K(\theta) = 3.97 \times$ 10⁻³cm/h,这与由 Campbell 法确定的 $K(\theta)$ = 3.85 × 10⁻³cm/h 也基本相符,说明 θ 值 是合理的. 在 θ 、v 和R 合理的条件下,由 于拟合曲线与实测值符合较好,故所确定的 **D**和 α 也是合理的.

科

坣

六、 结 论

对实验结果进行的分析得出如下结论:

1. 犁底层的透水能力差、其饱和导水率 不但远小于耕作层,而且也小于下包气带,是 决定污灌水下渗通量的控制层,会使水流在 下包气带呈非饱和状态。

2. Campbell 法和 Bresler 法所确定的 r(或 m),可用于实际污灌条件下计算非饱 和导水率和含水率.

3. 所采用的非饱和土柱能较好模拟污染物在非饱和土层中的迁移规律并获取所需参数. 氚弥散实验结果表明,除 R 外,饱和条件下的研究结果不能用于非饱和迁移计算.

参考文献

- [1] Bresler, E., D. Rasso and R. D. Miller, "Rapid Estimates of Unsaturated Hydraulic Conductivity Function." Soil. Sci. Soc. Am. J. 42: 170-172 (1978).
- [2] Campbell, G. S., "A Simple Method for Determining Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data." Soil Sci. 117: 311-314, (1974).
- [3] G. W. Gee et al., "Unstaturated Moisture and Radionuclide Transport", PNL-3610, 1981.

(收稿日期: 1988年11月1日)

Research on Transport and Transformation of Contaminants in the Unsaturated Vadose Water Zone

Nic Yongfeng. Liu Zhaochang and Li Yadong (Dept. of Environmental Engineering, Tsinghua University, Bei-110g)

The potential impact of contaminants on groundwater through transporting in unsaturated vadose zone was studied in this paper. By means of theoretical analysis, the methematical functions of convection, dispersion and adsorption-desorption processes of pollutants were touched. The main attention was paid to the permeability of tilling layer, plough pan and lower aeration zone. The plough pan was refered to the controlling layer of water permeation in terms of the measurement results of samples. The soil-water characteristic curves of three typical soils (fine silt, silt and very fine sand) were made out. The parameters for unsaturated hydraulic conductivity of loam was obtained through curve fitting. Compared with that of foreign scholars. The results were considered practicable. Furthermore, the transport and transformation of pollutants presented by tritium (tritiated water) were researched in an unsaturated column. (See pp. 2--6).

Cytogenetic Toxicity of Mercuric Chloride on Human L, mphocytes and Preventive Effect of Selenite

Meng Ziqiang and Zhang Lianzhen (Dept. of Environmental Sciences, Shanxi University, Taiyuan)

The protective effects of sodium selenite (Na2SeO3) against the cytogenetic toxicity of mercuric chloride (Hg- $Cl_{\underline{o}}$) were investigated on human whole-blood cultures in relation to induction of sister-chromatid exchanges (SCE) and delay of cell cycle. Mercuric chloride caused a dost-dependent increase in SCE and delay of cell cycle. It strongly affected the ability of human lymphocytes to divide in vitro, the number of cells dividing 3 times within 72 hours in culture was strongly decreased. Sodium selenite also induced SCE, but had only a smaller effects at the low concentration $(3 \times 10^{-5} \text{ mol/L})$ than mercuric chloride. SCE (requency increased significantly in culture only containing mercuric chloride of 1×10-*mol/L and cell toxicity appeared in culture only at the concentration of sodium sclenite of 1×10^{-5} mol/L. Beyond the limits, cell growth stopped. However, when selenite $(3 \times 10^{-2} 1 \times 10^{-7}$ mol/L) was added simultaneously to cell cultures containing mercuric chloride $(1 \times 10^{-5} \text{ mol/L})$, induction of SCE was prevented and the cell cycle was delayed. There existed a clear doserelated manner. When selenite and mercuric chloride were simultaneously ad led at a molar

ratio of Na₂SeO₃: HgCl₂=1:1, cells in treated cultures showed no increase in the SCE frequency and no delay in cell cycle time. These results indicate that sclenite and mercury mutually antagonize the ability to cause DNA damage leading to the formation of SCE and the delay of cell cycle. (See pp. 7–9)

A Preliminary Study on the Characteristics of Bioparticles in Anaerobic Attached Film Expanded Bed (AAFEB) Reactor

Xu Xianyang, Zheng Ping, Feng Xiaoshan (Environmental Science Department, Zhejing Agricultural University, Hangshou)

The characteristics of bioparticles in AAFEB reactor with continuous steady state operation has been studied in this paper. The biological mechanism for high efficiency operating performances of AAFEB reactor with steady state from these respects as follow: sludge retention time (SRT), microbial compositions (methanogens) in biofilm, change and distribution features of acid producing activity, methane producing activity and coenzyme F420 contents of bioparticle, which obtained from various sampling spots of AAFEB reactor during operation. Meanwhile, it is also showed that substrate transfer resistance exists in bioparticles or biofilm, and becomes of significance at low substrate concentration and in thick biofilm. (See pp. 10-15)

A Study on Photosynthetic Bacteria (PSB) Contact-Oxydation Process

Shi Jialiang and Xu Yatong (Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai); Sun Zhendi (Tong Xing Hosiery Manufactory, Shanghai)

Treating bean-food wastewater by using PSB contactoxydation process has been made in order to purify high concentration organic wastewater under the conditions of binited space. Upflow contact oxidation reactor with two stages has been adopted. Under the following conditions: influence COD_{cr} reaches 10500 mg/L(BOD, 6000 mg/L), container A volume load 10. $48 \text{ kg} \text{ COD}_{cr}/\text{M}^3$. day (6kg BOD_s/M³ · day), container A etrluent-COD_{cr} reaches $835 \text{ mg}/\text{L}(BOD, 1^{38}\text{ mg}/\text{L})$, percentage of COD_{cr} removal $92\%(BOD, \text{ removal percent$ $age 97.5\%})$. Under the conditions: container A + B volume load reaches $5.24 \text{ kg} \text{ COD}_{cr}/\text{M}^3$ · day (3kg BOD_s/M³ · day), effluent container A + B reaches $395 \text{ mg}/\text{L}(BOD_s, 38.7 \text{ mg}/\text{L})$, percentage 99.4%).

The quantity of PSB measured and the ratio of PSB/ heterotrophic bacteria in container A, which bears high load, is larger than that in container B. This illustrates