

# 二甲戊灵在草甸土和砂壤土中的吸附特性

王 磊<sup>1</sup>, 张 宇<sup>1</sup>, 谭亚军<sup>2</sup>, 范志先<sup>3</sup>

(1 华南热带农业大学 环境与植物保护学院, 海南 儋州 571737; 2 天津市产品质量监督检测技术研究院, 天津 300384;  
3. 青岛科技大学 化工学院, 山东 青岛 266042)

**[摘 要]** 为了明确二甲戊灵在土壤中的吸附性能, 采用气相色谱技术, 研究了二甲戊灵在草甸土和砂壤土中的吸附特性。结果表明, 二甲戊灵可被土壤强烈吸附, 吸附浓度与其在平衡溶液中的浓度呈良好的线性关系, 吸附特性符合 Freundlich 方程, 草甸黑土、砂壤土对二甲戊灵的吸附为物理吸附, 吸附量均很高, 吸附系数分别为 67.16 和 41.16, 且有机质含量高的草甸黑土吸附量大于有机质含量低的砂壤土。

**[关键词]** 二甲戊灵; 土壤; 吸附

**[中图分类号]** S482.4<sup>+</sup>4; X131.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2007)12-0115-05

## Study on absorption character of pendimethalin in soil

WANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, TAN Ya-jun<sup>2</sup>, FAN Zhi-xian<sup>3</sup>

(1 Environment and Plant Protection College, South China University of Tropical Agriculture, Danzhou, Hainan 571737, China;

2 Tianjin Product Quality Inspection Technology Research Institute, Tianjin 266042, China;

3 College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266042, China)

**Abstract:** The gas chromatographic was used to study the absorption of pendimethalin in black soil and sand soil. The isotherm data fitted the *Freundlich* equation. The absorption coefficient of black soil and sand soil were 67.16 and 41.16. The absorptive capacity were much higher in two different soils. Absorption rates of pendimethalin fitted the following order: black soil > sand soil. The results showed that the absorption of pendimethalin was higher in the high organic substance soil than that in the low organic substance soil and pendimethalin was absorbed consumingly by soil.

**Key words:** pendimethalin; soil; absorption

二甲戊灵(pendimethalin)的化学名称为 N(乙基丙基)-3,4-二甲基-2,6-二硝基苯胺,商品名称为杀草通、除草通、施田补,是美国氰胺公司开发的一种二硝基苯胺类常用除草剂,可用于玉米、大豆、小麦、花生、蔬菜、棉花等作物防除 1 年生禾本科杂草和一些阔叶杂草<sup>[1]</sup>。该药剂施入土壤后,大部分被土壤强烈吸附。吸附和解吸是农药在土壤-水环境中归宿的主要支配因素<sup>[2]</sup>,其影响农药最终归宿的吸附、降解、挥发、扩散、迁移等一些过程<sup>[3]</sup>。农药施

入土壤后,首先与土壤接触发生吸附作用,农药被吸附能力的大小与移动性成负相关,农药被吸附性愈强,其被淋溶作用愈弱,而农药被淋溶作用强弱是评价农药对地下水造成污染的一个重要参数<sup>[4-5]</sup>。因此,土壤对农药的吸附系数是农药登记和农药安全性评价的重要参数,可据此来预测农药在土壤中的吸附状况。农药在土壤环境中的迁移状况,可以通过室内模拟试验来获得<sup>[6]</sup>。本试验对二甲戊灵在草甸黑土、砂壤土中的吸附特性进行了研究,以期为更

\* [收稿日期] 2006-11-30

[基金项目] 华南热带农业大学校基金资助(Rnd0525 号)

[作者简介] 王 磊(1975—),男,吉林桦甸人,助理工程师,硕士,主要从事植物化学研究。

[通讯作者] 张 宇(1974—),女,河北昌黎人,讲师,主要从事农药毒理学研究。E-mail: yuzhang\_rain@163.com

安全、合理地使用该药剂,保护农田环境,防止对地下水污染提供依据<sup>[7-12]</sup>。

# 1 材料与方法

## 1.1 材料与仪器

**供试土壤** 草甸黑土,有机质含量 33 g/kg,pH 6.73,采自吉林农业大学试验站;砂壤土,有机质含量 12 g/kg,pH 8.41,采自济南历城区植保站。试验前将土壤风干,过 333 μm (40 目)标准筛。

**仪器设备** 日本岛津 GC-9A 气相色谱仪,恒温水浴振荡器 SHZ-88,离心机,旋转薄膜蒸发器,进样器,分液漏斗(250 mL)。

**试剂** 石油醚(沸点 60~90 ℃)为分析纯,用前重蒸馏;二甲戊灵标准样品,纯度 99%,由山东华阳科技股份有限公司生产。

## 1.2 试验方法

研究农药在土壤中吸附的方法有平衡法<sup>[13]</sup>和土柱法<sup>[14]</sup>。土柱法能较真实地反映农药施入土壤后的吸附性能,但由于难以控制农药加入土壤后淋溶的速度,因而差异较大<sup>[6]</sup>,故本试验采用平衡法。

**1.2.1 二甲戊灵标准溶液的配制** 先用正己烷配制成 5 000 mg/L 的二甲戊灵溶液,然后吸取一定量的二甲戊灵溶液用水稀释成 100 mg/L 的标准溶液,将此标准溶液作为母液,然后再逐级稀释成所需要的质量浓度。

**1.2.2 空白试验** 取 10.00 g 土于 100 mL 三角瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,(25±2) ℃水浴振荡 24 h 后,将土壤悬浮液移入离心管中,以 6 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液 10 mL 于分液漏斗中,加水至 50 mL,用石油醚萃取并定容至 50 mL,取 1 mL 上机测定,同时做平行试验。

**1.2.3 二甲戊灵在 2 种土壤中的添加回收率试验** 分别在 2 种土壤上做二甲戊灵添加回收率试验,添加浓度均设 0.01,0.1 和 1.0 mg/kg 3 个水平,各处理重复 3 次。取 10.0 g 土于 100 mL 三角瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,(25±2) ℃水浴振荡 24 h 后,将土壤悬浮液移入离心管中,以 6 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液 10 mL 于分液漏斗中,分别添加 0.01,0.1 和 1.0 μg/mL 的二甲戊灵标准溶液 1 mL,加水至 50 mL,用石油醚萃取并定容至 50 mL,取 1 mL 上机测定,同时做平行试验。

**1.2.4 二甲戊灵在土壤中的吸附试验** 称 10.0 g 土壤于 100 mL 具塞三角瓶中,分别加入 50 mL 质量浓度为 2.5,5.0,7.0 和 10 mg/L 的二甲戊灵标

准溶液。将瓶塞塞紧,摇匀,放在 25 ℃恒温水浴振荡器上振荡 24 h,然后将土壤悬浮液移入离心管中,以 6 000 r/min 离心 10 min,吸取上清液 10 mL 于分液漏斗中,加水至 50 mL,用石油醚萃取并定容至 50 mL,取 1 mL 供气相色谱测定,同时做平行试验。

## 1.3 测定条件

色谱柱:25 m×0.25 mm I. D. ×0.5 μm 膜厚的石英毛细管柱;固定相:OV-1701;温度:柱箱 70 ℃(保持 1 min),25 ℃/min 升温到 180 ℃(保持 34 min);气化室及检测室:320 ℃;载气:氢气;柱前压:1.2 MPa;补充气(make up gas):高纯氮气(纯度 99.999%);流量:20 mL/min;进样时间:2 min;检测器:63Ni-ECD。

## 1.4 定量方法

外标法定量,将二甲戊灵标准样品先用苯溶解,然后用正己烷定容配制 1 000 μg/mL 二甲戊灵标准溶液,再逐级用正己烷稀释,即可用于添加回收率试验和二甲戊灵标准曲线的建立。用石油醚及 0.01,0.05,0.10,0.20,0.30,0.40 和 0.50 μg/mL 二甲戊灵标准溶液建立标准曲线。以峰面积 Y 和进样量 X(ng)作图,得到直线回归方程  $Y = 10\,882 + 1\,002\,896 X$ , $r = 0.999\,6$ (见图 1)。

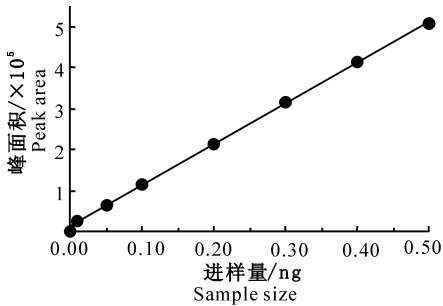


图 1 二甲戊灵标准曲线

Fig.1 Standard curve of pendimethalin

## 1.5 测定指标及其计算方法

**1.5.1 2 种土壤对二甲戊灵的等温吸附** 分子型有机农药被土壤吸附的规律可用 Freundlich 方程来描述<sup>[6]</sup>,即:

$$C_s = K_d \cdot C_e^{1/n} \text{ 或 } C_s = x/m;$$

根据吸附前后溶液质量浓度的变化,计算土壤的吸附质量浓度( $C_s$ )<sup>[6]</sup>:

$$C_s = x/m = (C_0 - C_e) \cdot v/m_0.$$

式中: $K_d$  表示土壤吸附系数, $C_e$  表示平衡溶液中农药的质量浓度(μg/mL), $1/n$  表示拟合系数<sup>[15]</sup>, $x$  表示吸附于土壤中的农药质量(μg), $m$  表示土壤质量

(g), $C_0$  表示农药初始质量浓度( $\mu\text{g/mL}$ ), $v$  表示溶液体积(mL), $C_s$  表示土壤对农药的吸附质量浓度( $\mu\text{g/mL}$ )。

吸附率( $R_{\text{吸}}$ )计算公式为:

$$R_{\text{吸}}=(C_0-C_e)/C_0\times100\%。$$

1.5.2 2 种土壤对二甲戊灵的吸附自由能 土壤对农药吸附自由能变化( $\Delta G$ )的计算公式为:

$$\Delta G=-RT\ln K_{om}。$$

式中: $\Delta G$  表示吸附时的自由能变化(kJ/mol); $R$  为气体常数, $R=8.313\text{ kJ/mol}$ ;  $T$  表示绝对温度<sup>[6]</sup>;  $K_{om}$  表示单位土壤有机质的吸附常数。

2 结果与分析

2.1 二甲戊灵在 2 种土壤中的添加回收率

由表 1 可以看出,二甲戊灵在草甸黑土和砂壤土中的回收率平均值符合测定要求。本方法对二甲戊灵的最小检出量为  $5\times10^{-12}\text{ g}$ ,最低检出质量浓

度为  $0.001\text{ }\mu\text{g/mL}$ 。

2.2 2 种土壤对二甲戊灵的等温吸附特性

农药在土壤、沉积物上的吸附等温线大多符合 Freundlich 模型<sup>[16-17]</sup>,因此,将 2 种土壤对二甲戊灵的等温吸附用 Freundlich 方程拟合。将按照对数形式进行拟合后计算所得的拟合参数列于表 2,将平衡后土壤的吸附质量浓度  $C_s$  与溶液中农药的平衡质量浓度  $C_e$  进行一元线性回归,结果见表 2。

由表 2 可以看出,2 种土壤对二甲戊灵的等温吸附用 Freundlich 方程拟合后,拟合系数分别为 1.07 和 1.15,说明 2 种土壤对二甲戊灵的等温吸附可以用 Freundlich 方程拟合,该方程能够较好地反映二甲戊灵在 2 种土壤中的吸附规律。二甲戊灵的吸附质量浓度  $C_s$  与溶液平衡质量浓度  $C_e$  的一元线性回归呈很好的相关性, $r$  值均在 0.99 以上,且草甸黑土对二甲戊灵的吸附量大于砂壤土,吸附能力强于砂壤土。

表 1 二甲戊灵在 2 种土壤中的添加回收率

Table 1 Recovery of pendimethalin fortify in two sorts of soil

| 样品<br>Matrix       | 称样量/g<br>Sample | 添加量/ $\mu\text{g}$<br>Fortification<br>amount | 添加水平/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<br>Fortification level | 回收率/% Recovery |       |       |            | 标准偏差/%<br>STDEV |
|--------------------|-----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------|------------|-----------------|
|                    |                 |                                               |                                                                    | I              | II    | III   | 平均 Average |                 |
| 草甸黑土<br>Black soil | 10              | 0.1                                           | 0.01                                                               | 85.53          | 95.16 | 86.35 | 89.01      | 6.00            |
|                    | 10              | 1.0                                           | 0.1                                                                | 92.60          | 88.45 | 91.51 | 90.85      | 2.37            |
|                    | 10              | 10                                            | 1.0                                                                | 89.21          | 95.37 | 87.32 | 90.63      | 5.87            |
| 砂壤土<br>Sandy loam  | 10              | 0.1                                           | 0.01                                                               | 89.45          | 91.37 | 85.74 | 88.85      | 3.21            |
|                    | 10              | 1.0                                           | 0.1                                                                | 86.96          | 89.53 | 92.43 | 89.64      | 3.57            |
|                    | 10              | 10                                            | 1.0                                                                | 90.24          | 91.64 | 87.56 | 89.81      | 3.28            |

表 2 2 种土壤对二甲戊灵吸附特性的比较

Table 2 Absorption of pendimethalin in two sorts of soil

| 土壤类型<br>Soil type  | 初始质量<br>浓度 $C_0$ /<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )<br>Initial density | 平衡质量<br>浓度 $C_e$ /<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )<br>Balance density | 吸附率/%<br>Absorption<br>rate | 吸附质量浓度 $C_s$<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ )<br>Absorb<br>density | 吸附量/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )<br>Absorption<br>amount | 吸附系数 $K_d$<br>Absorption<br>coefficient | 拟合系数 $1/n$<br>Fit<br>coefficient | 相关系数 $r$<br>Correlation<br>coefficient |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|
| 草甸黑土<br>Black soil | 2.5                                                                           | 0.20                                                                          | 92.0                        | 11.5                                                                      | 57.50                                                               | 67.16                                   | 1.07                             | 0.997 1                                |
|                    | 5.0                                                                           | 0.35                                                                          | 93.0                        | 23.2                                                                      | 116.25                                                              |                                         |                                  |                                        |
|                    | 7.5                                                                           | 0.55                                                                          | 92.6                        | 34.8                                                                      | 173.75                                                              |                                         |                                  |                                        |
|                    | 10                                                                            | 0.72                                                                          | 92.8                        | 46.4                                                                      | 232.00                                                              |                                         |                                  |                                        |
| 砂壤土<br>Sandy loam  | 2.5                                                                           | 0.31                                                                          | 87.6                        | 11.0                                                                      | 54.75                                                               | 41.16                                   | 1.15                             | 0.993 9                                |
|                    | 5.0                                                                           | 0.59                                                                          | 88.2                        | 22.0                                                                      | 110.25                                                              |                                         |                                  |                                        |
|                    | 7.5                                                                           | 0.88                                                                          | 88.3                        | 33.1                                                                      | 165.50                                                              |                                         |                                  |                                        |
|                    | 10                                                                            | 1.00                                                                          | 90.0                        | 45.0                                                                      | 225.00                                                              |                                         |                                  |                                        |

分别用 2 种土壤中二甲戊灵的平衡质量浓度  $C_e$  与初始质量浓度  $C_0$  作吸收曲线,结果见图 2。由图 2 可以看出,2 种土壤对二甲戊灵的吸附曲线均为 L 型,低浓度时就有很好的吸附,且进入土壤中农药的初始浓度越高,平衡后土壤中农药的浓度就越高,呈很好的相关性,这是分子型农药在土壤中的吸附特点。同一初始浓度下,二甲戊灵在草甸黑土

中的平衡浓度低于砂壤土,吸附浓度则高于砂壤土。

2.3 土壤有机质含量对二甲戊灵吸附的影响

土壤对农药的吸附性与土壤的粘粒含量、代换量、有机质含量及 pH 值等理化性质有关<sup>[18]</sup>;而对于分子型有机农药的吸附性能,主要决定于土壤有机质含量的高低<sup>[19]</sup>。

草甸黑土有机质含量为  $33\text{ g/kg}$ ,砂壤土有机质

含量为 12 g/kg,结合表 2 可以看出,2 种土壤对二甲戊灵的吸附系数与土壤有机质含量之间呈较好的相关性。随着土壤有机质含量的降低,土壤对二甲戊灵的吸附量减小;因此,可以根据土壤有机质含量的高低,来预测其对农药吸附能力的大小<sup>[20]</sup>。有机质含量高则吸附能力强,由于草甸黑土的有机质含量高于砂壤土,由此推断草甸黑土对二甲戊灵的吸附能力强于砂壤土。

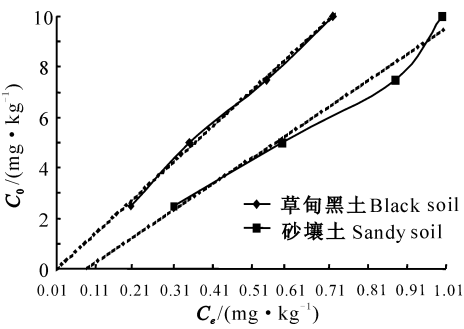


图 2 二甲戊灵在草甸黑土和砂壤土中的吸附曲线  
Fig.2 Adsorption isotherms of pendimethalin in soil

2.4 2 种土壤对二甲戊灵吸附的自由能变化

土壤吸附时的自由能变化,是反映土壤吸附特性的重要参数。根据吸附自由能的变化,可以推断土壤吸附的机制。当自由能变化小于 41.858 kJ/mol时,为物理吸附;反之为化学吸附<sup>[6]</sup>。

由表 3 可以看出,2 种土壤中二甲戊灵的吸附自由能  $\Delta G$  均小于 41.858 kJ/mol,属于物理吸附。

表 3 2 种土壤对二甲戊灵吸附的自由能变化  
Table 3 Change of free energy of pendimethalin in two sorts of soil

| 土壤<br>Soil type    | $K_d$ | $K_{om}$ | $\Delta G/(kJ \cdot mol^{-1})$ |
|--------------------|-------|----------|--------------------------------|
| 草甸黑土<br>Black soil | 67.16 | 2 035.2  | -18.999                        |
| 砂壤土<br>Sandy loam  | 41.16 | 3 466.7  | -20.326                        |

3 讨 论

本研究结果表明,土壤对农药吸附能力的大小,主要与土壤的理化性质及农药本身的性质有关,其中有机质含量是影响土壤对农药吸附的最重要因素<sup>[6,18-21]</sup>。有机质含量高则吸附能力强,由于草甸黑土的有机质含量高于砂壤土,所以草甸黑土的吸附能力强于砂壤土。将  $K_d$  值除以有机质含量得  $K_{om}$ ,即单位有机质含量所对应的吸附系数, $K_{om}$  的大小可反映除有机质外其他因素如农药的疏水特性、土壤 pH 值等对农药吸附的影响情况。按照蔡

道基<sup>[6]</sup>的分级方法,二甲戊灵应属于极易被吸附类农药且为物理吸附。

根据 Weber 等<sup>[22]</sup>和 Zheng 等<sup>[23]</sup>的报道,二甲戊灵很难被解吸。从二甲戊灵本身的结构看,苯环上连有 2 个硝基(-NO<sub>2</sub>)和 1 个氨基(-NH<sub>2</sub>),其中硝基上的氮和氧及氨基上的氮都可与土壤颗粒间产生氢键,产生较高的氢键键能,使二甲戊灵与土壤颗粒间结合更加牢固,形成稳定的共轭体系。也正是由于其低的水溶性和高能氢键,才使二甲戊灵在土壤上被强烈地吸附,且解吸很困难。按照 Cooper 等<sup>[24]</sup>的观点,可将二甲戊灵归为非淋溶性化合物,其对地下水污染的危害相对较小,但其潜在危害仍值得研究<sup>[8]</sup>。

4 结 论

草甸黑土和砂壤土对二甲戊灵的吸附质量浓度  $C_s$  与其在平衡溶液中的质量浓度 ( $C_e$ ) 呈良好的线性关系,用 Freundlich 方程来拟合所得拟合系数和相关系数说明,二甲戊灵的等温吸附线可以用 Freundlich 方程来拟合,该方程能较好地反映供试农药在土壤中的吸附规律。草甸黑土、砂壤土对二甲戊灵的吸附系数分别为 67.16 和 41.16,为物理吸附;吸附量为草甸黑土>砂壤土,且吸附量都很高。表明二甲戊灵可被土壤强烈地吸附,不易被淋溶,不易迁移,对地下水污染的危害较小,从这个意义上讲,是一个值得大面积推广的药剂,但其对后茬作物的影响,还有待于进一步研究。

[参考文献]

[1] 农业部农药检定所.新编农药手册[M].北京:农业出版社,1989.  
[2] 刘维屏,季 瑾.吸附、脱附——农药在土壤—水环境中归宿的主要支配因素[J].中国环境科学,1996,16(1):25-30.  
[3] Beltran J, Hernandez F, Lopez F J, et al. Study of sorption processes of selected pesticides on soils and ceramic porous cups used for soil solution sampling[J]. Inter J Environ Anal Chem,1995,58:287-303.  
[4] 王连生.有机污染物化学[M].北京:科学出版社,1990:10-52.  
[5] Kenaga E E, Coring C A. Relationship between water solubility, soil sorption, octanol-water partitioning, and bioconcentration of chemicals in biota[J]. Philadelphia, 1980:75-115.  
[6] 蔡道基.农药环境毒理学研究[M].北京:中国环境科学出版社,1999.  
[7] 王 军,朱鲁生,林爱军,等.二甲戊乐灵的残留毒理研究现状[J].农药,2001,40(6):8-11.  
[8] 朱鲁生,王 军,林爱军,等.二甲戊乐灵的土壤微生物生态效应[J].环境科学,2002,23(3):88-91.

- [9] Barua A S, Saha J, Chaudhuri S. Degradation of pendimethalin by soil fungi[J]. Pestic Sci, 1990, 29(4): 419-425.
- [10] Singh S B, Kulshrestha G. Microbial degradation of pendimethalin[J]. J Environ Sci Health Part B Pestic Food Contam Agric Wastes, 1991, 26(3): 309-321.
- [11] Zimdahl R L, Catizone P, Butcher A C. Degradation of pendimethalin in soil[J]. Weed Sci, 1984, 32(3): 408-412.
- [12] Kulshrestha G, Singh S B. Influence of soil moisture and microbial activity on pendimethalin degradation[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1992, 48(2): 269-274.
- [13] 孙锦荷, 张永熙, 陈子元. 速灭菊酯在土壤中的吸附性研究[J]. 农业环境保护, 1985(2): 1-4.
- [14] O'Connor G A, Wierenga P J. Movement of 2,4,5-T through large soil columns[J]. Soil Sci, 1980, 130(3): 157-162.
- [15] 李克斌, 刘广深, 刘维屏. 酰胺类除草剂在土壤上吸附的位置能量分布分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 574-580.
- [16] Kan A T, Fu G. Adsorption/ desorption hysteresis in organic pollution and soil/ sediment[J]. Environ Sci Technol, 1994, 28: 859-867.
- [17] Mindelgrin U, Gerstl Z. Reevaluation of partitioning as a mechanism of nonionic chemicals adsorption in soils[J]. J Environ Qual, 1983, 12: 1-11.
- [18] 李改枝, 赵惠, 吕三虎. 苯甲酸在土壤中的吸附研究[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学(汉文)版, 2004, 33(1): 56-58, 62.
- [19] 方晓航, 仇荣亮. 农药在土壤环境中的行为研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 94-97.
- [20] 蒋新明, 蔡道基. 化学农药对生态环境安全性评价研究(八)——农药在土壤中的吸附与解吸[J]. 农村生态环境, 1987(4): 11-14.
- [21] 宣日成, 王琪全, 郑巍, 等. 吡虫啉在土壤中的吸附及作用机理研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 198-201.
- [22] Weber J B, Blumhorst M R, Swain I R. Efficacy of selected herbicides as influenced by soil properties[J]. Weed Technol, 1990, 4(2): 279-283.
- [23] Zheng S Q, Cooper J F. Movement of pendimethalin in soil of the south of France[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1993, 30(4): 492-498.
- [24] Cooper J F, Zheng S Q. Behavior of pendimethalin in tropical and mediterranean plant field condition[J]. J Environ Sci Health (Part B) Pestic Food Contam Agric Wastes, 1994, 29(3): 443-457.

(上接第 114 页)

- [41] Lal R. Soil erosion on alfisols in Western Nigeria; nutrient elements losses in runoff and eroded sediments[J]. Geoderma, 1986, 16: 403-417.
- [42] 陈国军, 曹林奎, 陆贻通, 等. 稻田氮素流失规律测坑研究[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, 21(4): 320-324.
- [43] 许书军, 魏世强, 黄进, 等. 三峡库区农田养分动态及非点源污染情势[J]. 能源环境保护, 2003, 17(4): 52-55.
- [44] 肖军, 赵景波. 农药污染对生态环境的影响及防治对策[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(12): 2376-2377.
- [45] 李光录. 黄土高原南部土壤退化机理研究[J]. 云南环境科学, 2000, 19(增刊): 89-92.
- [46] Crawford N H, Donigan A S. Pesticide transport and runoff model for agricultural lands. EPA-660/2-74-013. Athens, GA: U. S. Environmental Protection Agency, 1973.
- [47] 王全九, 王文焰, 沈晋. 黄土坡面溶质随径流迁移相应函数模型[J]. 水利学报, 1994(11): 18-21, 36.
- [48] Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-runoff[J]. J of Environ Qual, 1983, 12(1): 34-40.
- [49] Wallach R, Jury W A, Spencel W F. Transfer of chemicals from soil solution to surface runoff: A diffusivity-based soil model[J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52: 612-618.
- [50] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 312-321.
- [51] Zhang X C, Norton L D, Lei T, et al. Coupling mixing zone concept with convection-diffusion equation to predict chemical transfer to surface runoff[J]. Transactions of ASAE, 1999, 42: 987-994.
- [52] 刘保元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345-350.
- [53] 任理, 马军花. 考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型[J]. 水利学报, 2001(5): 38-44.
- [54] 杨金忠, 蔡树英, 伍靖伟. 宏观水力传导度及弥散度的确定方法[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 179-183.
- [55] 晏维金, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 332-337.
- [56] Knisel W G, Leonard R A, Davis F M. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. Users Manual. No. 5. University of Georgia Coastal Plain Experiment Station Bio and Agriculture. Engineering Publication, 1993.
- [57] Chung S O, Ward A D, Schalk C W. Evaluation of the hydrologic component of the ADAPT water table management model[J]. Transactions of ASAE, 1992, 35(2): 571-579.
- [58] King C, Lecomte V, Le Bissonnais Y, et al. Remote-sensing data as an alternative input for the 'STREAM' runoff model[J]. Catena, 2005, 62: 125-135.