

王庆海, 庞卓, 郑瑞伦, 等. 等高草篱对坡耕地土壤苯磺隆残留迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1081–1089.

WANG Qing-hai, PANG Zhuo, ZHENG Rui-lun, et al. Effects of contour grass hedges on migration of tribenuron-methyl residue in sloping cropland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1081–1089.

等高草篱对坡耕地土壤苯磺隆残留迁移的影响

王庆海¹, 庞卓¹, 郑瑞伦¹, 李翠¹, 陈洁¹, 马雪菊¹, 却晓娥^{2*}

(1.北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097; 2.中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要:在北京市昌平区冬小麦田采用模拟降雨的方法, 对不同坡位(坡中和坡底)的土壤进行分层(0~5、5~10、10~15 cm)取样测定, 研究了草木樨和狼尾草两种等高草篱在不同雨强(15、20 mm·h⁻¹)和坡度(15%和20%)条件下对土壤苯磺隆残留迁移及分布特征的影响。结果表明, 前期干旱条件下, 降雨后土壤苯磺隆残留纵向迁移特征明显, 无明显的水平移动, 亦未产生残留径流输出。草篱能够促进土壤中苯磺隆残留向下迁移, 导致草篱带内和无草篱区域土壤中的残留纵向分布特征有较大差异: 草篱带内3个土层残留水平相近, 而对应坡位无草篱区域残留主要滞留于土壤表层, 并随土层加深而显著降低。雨强、草篱、坡度均对土壤苯磺隆残留量有显著影响, 草篱的贡献超过雨强和坡度, 成为影响坡耕地农药残留纵向迁移行为的首要因素。

关键词: 草篱; 农药残留; 迁移特征; 坡耕地

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2016)06-1081-09 doi:10.11654/jaes.2016.06.009

Effects of contour grass hedges on migration of tribenuron-methyl residue in sloping cropland soil

WANG Qing-hai¹, PANG Zhuo¹, ZHENG Rui-lun¹, LI Cui¹, CHEN Jie¹, MA Xue-ju¹, QUE Xiao-e^{2*}

(1.Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2.Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Here we evaluated the effects of two grass hedges, *Melilotus officinalis* and *Pennisetum alopecuroides*, on migration and distribution of tribenuron-methyl residue in sloping cropland soil. Experiments were carried out in winter wheat (*Triticum aestivum*) field on 15% and 20% gradient slopes in the Changping District of Beijing, China, under simulated rainfall (rainfall intensity at 15 and 20 mm·h⁻¹). Soil samples were collected from the middle and bottom positions of the slope at three depths (0~5, 5~10 and 10~15 cm). Results indicated that the movement of tribenuron-methyl in soil was dominated by vertical migration when rainfall events occurred after a long dry period. The horizontal migration was not obvious, with no residues detected in the surface runoff. Grass hedges accelerated the vertical migration of tribenuron-methyl residues. The residual levels of tribenuron-methyl did not differ among 3 soil depths inside the hedges, whereas tribenuron-methyl residues were markedly higher in topsoil than in subsurface soil, and decreased significantly with increasing soil depth in slope areas without hedges. Grass hedge, rainfall intensity and slope gradient significantly influenced the transport of tribenuron-methyl residues in soil. The optimal scaling regression showed that grass hedge was the dominant factor, followed by rainfall intensity and slope gradient, in controlling pesticide migration on sloping croplands.

Keywords: contour grass hedge; herbicide residue; migration characteristics; sloping cropland

收稿日期: 2016-01-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B02)

作者简介: 王庆海(1973—), 男, 河北张家口人, 博士, 研究员, 主要从事植物生理生态学、退化生态系统恢复与重建研究。E-mail: qinghaiw@sina.com

* 通信作者: 却晓娥 E-mail: quexiaoe@sina.com

苯磺隆属磺酰脲类除草剂,是华北地区防治麦田阔叶杂草最常用的除草剂之一。虽然苯磺隆属于低毒除草剂,但由于其具有较强的极性、极高的水溶性和植物毒性,其潜在的环境风险已引发关注^[1]。苯磺隆残留对农田生态系统和水生生态系统均有显著的负面影响,有研究表明:苯磺隆在农田中的累积会导致土壤动物的种类和数量减少^[2],短期内对土壤酶活性有抑制作用^[3]。此外,苯磺隆单施或与其他除草剂混用还会抑制土壤微生物的种群数量^[4-5],进而影响农田土壤呼吸,增加温室气体 CO₂ 和 N₂O 的产生与排放^[6]。苯磺隆对一些非靶标水生动植物也具有明显的毒害作用^[7-8]。

地表径流是农药从坡地转移至水体的一个重要途径^[9]。草篱技术是防止水土流失经济有效的方法,可以显著减少地表径流量和土壤流失量^[10-11],进而有效控制氮、磷、农药等面源污染物的流失^[12-13],降低水土环境受污染的风险。另一方面,草篱植物在自身生长过程中,可以吸收、降解、钝化土壤中残留的除草剂及其他有机污染物,从而减轻污染物对农田生态系统的负面影响^[14]。

磺酰脲类除草剂不但在土壤中随水迁移性较强,同时也具有横向扩散的性能^[15]。为了明确不同雨强和坡度条件下草篱对坡地农药残留迁移规律的影响,评价苯磺隆残留转移扩散的风险,本文选择两种华北地

区常用的草篱植物草木樨(*Melilotus officinalis*)和狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)构建植物篱,研究了草篱技术措施干预下坡地土壤中苯磺隆残留的迁移特征,为农业面源污染的有效控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于北京市昌平区小汤山镇国家精准农业示范基地(东经 116°26',北纬 40°10'),海拔约为 50 m。该区地处华北平原北缘,主要地貌类型为平原、丘陵和浅山,属于典型的暖温带半湿润大陆季风气候区。年平均气温 11.5℃,平均无霜期 190 d。该地区主要大田作物为玉米(*Zea mays* L.)和冬小麦(*Triticum aestivum* L.)。多年平均降水量为 640 mm,降水主要集中在夏季(6—8月),占年降水量的 70%以上。试验小区土壤主要理化性质指标见表 1。

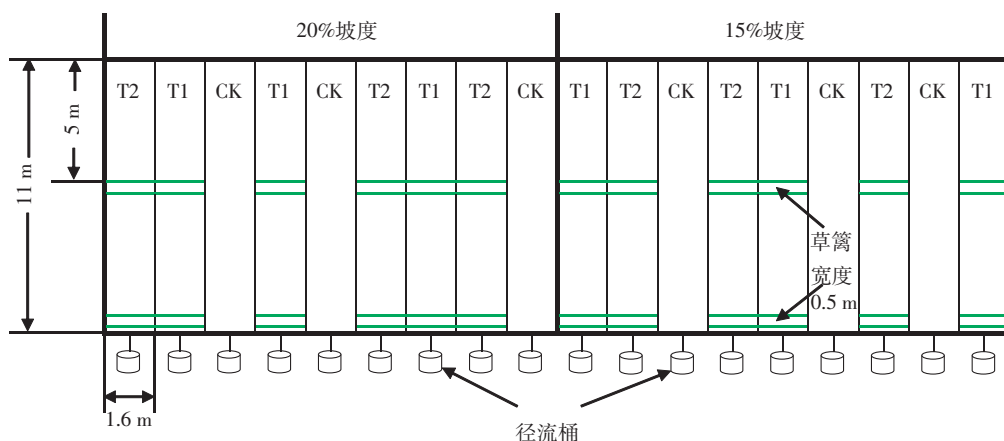
1.2 试验设计

试验在模拟降雨条件下进行,设雨强、坡度和草篱 3 因素,其中雨强设 15、20 mm·h⁻¹ 2 水平,坡度设 15%和 20% 2 水平,草篱设无草篱对照(CK)、草木樨草篱(T1)和狼尾草草篱(T2) 3 水平,并进行完全区组试验设计,即 6 种处理,每处理 3 次重复,共 18 个小区(图 1)。狼尾草是北方地区优良的草篱候选草种^[16],

表 1 试验小区土壤的主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of soil in experimental plots

pH	容重/ g·cm ⁻³	表层 0~10 cm 硬度/kg·cm ⁻²	机械组成/%			饱和导水率/ cm·h ⁻¹	有机质含量/ g·kg ⁻¹	全氮含量/ g·kg ⁻¹	全磷含量/ g·kg ⁻¹
			沙粒	粉粒	黏粒				
7.6	1.37	7.87	41	24	35	0.18	14	0.81	0.82



T1 为草木樨草篱, T2 为狼尾草草篱, CK 为无草篱对照。下同

T1=*Melilotus* hedge, T2=*Pennisetum* hedge, and CK=Control. The same below

图 1 不同坡度试验小区布置图

Figure 1 Schematic diagram of experimental plots

草木樨生长迅速,耐瘠薄、寒冷和干旱,根系发达,具有良好的水土保持效果^[17],也是理想的草篱候选草种。

1.3 试验方法

在径流场中设置与试验设计相对应的18个径流小区,其宽×长=1.6 m×11.0 m,底部安装有径流桶以收集径流和泥沙。对草篱处理,在径流小区中部和底部两个坡位(坡中和坡底)的等高方向上各配置1条草篱带,草篱带宽0.5 m,两草篱带间距为5 m。狼尾草草篱为2012年7月育苗移栽,移栽株距10 cm、行距25 cm,种植3行。2012年8月底播种草木樨草篱(撒播),播种量为15 kg·hm⁻²。至本试验开始时(2013年4月),狼尾草和草木樨均已形成了密集的草篱带,草篱带内盖度接近100%。两草篱带间分别于2012年和2013年9月底种植冬小麦。由于草木樨为两年生草本植物,2013年试验结束后,于该年8月底再次播种,供2014年试验使用。

试验分别于2013年4月8日和2014年4月12日开始。试验先进行除草剂苯磺隆喷施,施药量为21 g·hm⁻²(有效成分用量)。施药4 h后进行模拟降雨,使用中农先飞(北京)农业工程技术有限公司建造的人工模拟降雨系统,Xiao等^[18]对该系统进行了详细描述。根据当地该季节的降雨特征,模拟降雨设计雨强为2013年15 mm·h⁻¹,2014年20 mm·h⁻¹,使用标准雨量筒实际测定的雨强分别为12.33、21.43 mm·h⁻¹,降雨历时3 h。由于前期无有效降水、土壤含水量偏低,人工降雨后没有产生地表径流。降雨结束1 h后分层采集土壤样品。一般认为在常规大容量喷雾中,农药的利用率仅为20%~30%,26 mm的降雨后农药在植物叶面的沉积量约为无雨时的20%^[19]。而本研究中最低降雨量为45 mm,叶面沉积量会更低,因此叶面残留量对实际进入土壤的量影响不显著。本试验设0~5、5~10、10~15 cm 3个土层深度水平。T1和T2处理的每个小区土样采集点分别位于草篱区域的上、下、左、右边缘和中部,同一土层五个样点的土样混匀后为一个小区该土层对应坡位的土样;CK处理的每个小区土样采集点与T1和T2的坡位相同,采样方法亦相同,取样区域有小麦覆盖。土样在实验室内用冷冻真空抽干机在低温下脱水干燥。根据低温干燥前后土壤样品的质量差,计算土壤含水量。将干燥后的样品过32目(孔径为0.5 mm)的土壤筛,参照秦曙等^[20]的方法进行前处理和净化,称取5 g土样,加入1 g无水硫酸镁,用乙腈溶液重复提取两次,提取液离心后取

上清液用C₁₈净化,净化液过0.22 μm滤膜后,用高效液相色谱-质谱联用法测定苯磺隆含量。平均回收率为87.0%,最低检出浓度为1.25 μg·kg⁻¹。

1.4 数据分析

使用SAS 9.0统计分析软件进行方差分析,使用SPSS 22.0统计分析软件中的最优尺度回归分析(Optimal scaling)对土壤苯磺隆残留量与草篱、坡位(无序分类变量)以及雨强、坡度和土层深度等因素进行回归分析,以定量评价各因素对土壤苯磺隆残留量的贡献率和重要性。采用Origin 9.2绘图。

2 结果与讨论

2.1 草篱对土壤含水量的影响

本试验条件下,降雨后0~15 cm土层的土壤含水量表现为大雨强显著高于小雨强(图2,表2)。由于本研究两个雨强降雨历时相同,所以大雨强降雨量也高,可见降雨量的大小对土壤水分的影响效果不同,草篱带内土壤含水量显著高于对应坡位的无草篱区域,两种草篱带内的土壤含水量处于同一水平(表2)。Agus等^[21]的研究结果也表明植物篱种类对土壤含水量无显著影响。植物篱雨季能够拦蓄地表径流,促进水分向深层土壤渗透,具有提高篱带内土壤含水量和土壤贮水量的功能^[22-23]。草篱通过蓄持地表径流而提高土壤含水量的作用在本研究中体现得明显,不同坡度和坡位土壤含水量无显著差异(表2)。但在菲律宾开展的相关研究指出,植物篱上下两侧及不同坡位的土壤水分存在差异^[21],这可能是由于研究地域不同所致。坡度通过改变地表径流或壤中流的体量和流速而影响土壤含水量,而本研究是在干旱季节进行,土壤含水量本底值较低,降雨后未形成遍及整个小区的地表径流,大部分雨水在原地入渗到土壤中。因此,坡度对土壤含水量的影响被削弱,随之坡位间土壤含水量亦无显著差异(表2)。但雨强与坡位有显著的互作效应,大雨强条件下坡底的土壤含水量显著高于坡中。可以看出,20 mm·h⁻¹雨强条件下,水分沿坡面有比较明显的水平移动,但无径流产生,表明该雨强未超过土壤的实际入渗能力。李毅等^[24]的研究证实,雨强为33 mm·h⁻¹且降雨时间不超过1 h时,坡度不高于25°的土壤均无径流产生。土壤含水量呈现出随土层深度增加而逐渐降低的变化趋势(图2)。表层(0~5 cm)土壤含水量显著高于5~10、10~15 cm土层,5~10、10~15 cm土层间则无显著差异(表2)。这主要是由于前期土壤含水量低,降雨主要持留于表层土壤,

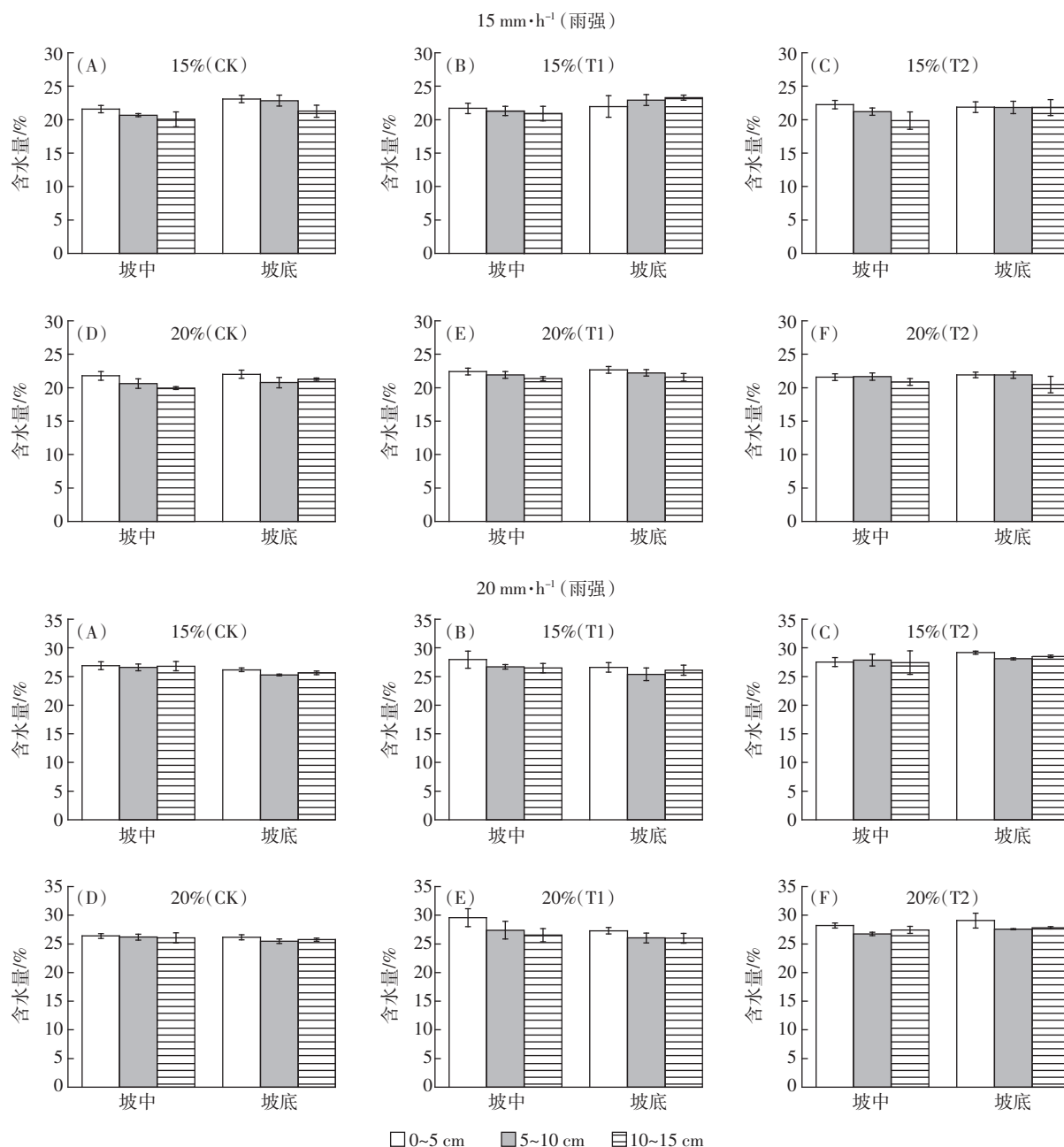


图2 不同雨强和坡度条件下的土壤含水量

Figure 2 Soil water content of sloping cropland under different rainfall intensities and slope gradients

在表层土壤水分未达到饱和前水分向较深层次迁移的量比较少。由此可见,前期干旱的条件下,降雨后坡地土壤水分主要分布于表层,向深层次土壤运移过程比较缓慢,水平移动的规模也有限。

2.2 草篱对土壤苯磺隆残留的影响

雨强对0~15 cm土层苯磺隆残留具有显著的影响,小雨强显著高于大雨强。雨强对苯磺隆的影响在于:一方面,降雨对小麦叶片表面附着的苯磺隆的冲刷作用,且冲刷作用随着降雨强度的增强而显著上

升^[25];另一方面,大雨强导致更多的苯磺隆下渗到更深土层。农药残留的分布特征与降雨历时和降雨强度密切相关已在相关研究^[26]中得到证实。草篱对土壤苯磺隆残留亦有显著影响(图3,表2)。0~15 cm土层内苯磺隆残留量表现为草篱带内显著低于对应坡位的无草篱区域,草木樨草篱带内显著高于狼尾草草篱带内。本研究未产生地表径流,因此土壤苯磺隆残留未产生径流输出。产生这样差异的原因是草篱带内比对应坡位无草篱区域有更多的残留下渗到15 cm以下

表 2 土壤含水量和苯磺隆含量方差分析结果

Table 2 ANOVA results of soil water content and tribenuron-methyl residues

影响因素	自由度	土壤含水量			土壤苯磺隆残留量		
		平方和	F	P	平方和	F	P
r	1	1 485.98	913.42	<0.000 1	85 984.75	276.48	<0.000 1
a	2	35.41	10.88	<0.000 1	182 806.74	293.90	<0.000 1
b	1	0.35	0.21	0.645 5	3 351.74	10.78	0.001 4
c	1	2.15	1.32	0.252 7	232.63	0.75	0.388 9
d	2	33.03	10.15	<0.000 1	11 672.52	18.77	<0.000 1
rx a	2	34.82	10.70	<0.000 1	37 975.65	61.05	<0.000 1
rx b	1	0.61	0.37	0.541 5	672.53	2.16	0.144 1
rx c	1	17.05	10.48	0.001 5	1 045.33	3.36	0.069 3
rx d	2	4.81	1.48	0.231 8	2 966.26	4.77	0.010 2
a x b	2	4.24	1.30	0.275 0	1 205.53	1.94	0.148 6
a x c	2	5.53	1.70	0.186 8	551.39	0.89	0.414 9
a x d	4	0.25	0.04	0.997 0	20 885.76	16.79	<0.000 1
b x c	1	3.25	2.00	0.159 5	61.40	0.20	0.657 6
b x d	2	2.12	0.65	0.523 0	2 467.53	3.97	0.021 6
c x d	2	2.08	0.64	0.529 9	1 964.76	3.16	0.046 2
rx a x d	4	9.18	1.41	0.233 8	5 782.96	4.65	0.001 6
rx b x c	1	3.04	1.87	0.173 7	268.13	0.86	0.355 1
rx b x d	2	0.29	0.09	0.914 9	564.12	0.91	0.406 6
rx c x d	2	1.34	0.41	0.662 6	1 398.04	2.25	0.110 2
a x b x c	2	0.63	0.19	0.824 9	472.93	0.76	0.469 8
b x c x d	2	0.43	0.13	0.876 7	96.79	0.16	0.856 1
a x b x d	4	3.27	0.50	0.734 4	4 400.99	3.54	0.009 2
a x c x d	4	2.32	0.36	0.839 4	5 026.93	4.04	0.004 2
rx a x b x c	2	0.87	0.27	0.766 2	301.53	0.48	0.617 1
rx b x c x d	2	2.23	0.69	0.505 8	654.29	1.05	0.352 6
rx a x b x d	4	3.00	0.46	0.764 2	384.83	0.31	0.871 2
rx a x c x d	4	0.92	0.14	0.966 2	4 593.92	3.69	0.007 2
a x b x c x d	4	3.40	0.52	0.719 0	222.59	0.18	0.948 9
rx a x b x c x d	4	2.06	0.32	0.866 8	128.60	0.10	0.981 1

注:r 为雨强,a 为草篱处理,b 为坡度,c 为坡位,d 为土层深度。

Note:r= rainfall intensity,a=grass hedge,b=slope gradient,c=slope position,d=soil depth.

的土层中。坡度对土壤苯磺隆残留亦有显著影响,大坡度高于小坡度,这可能是低坡度处理水分下渗量多于高坡度所致。不同坡位土壤中的苯磺隆残留量无显著差异,表明土壤苯磺隆残留发生水平迁移的规模小、距离短,或未发生明显的水平移动,这与降雨后试验小区水分水平迁移的规模和程度有限密切相关。雨强与草篱有显著的交互作用,而坡度、坡位与草篱却无显著交互作用。由此可见,雨强显著影响草篱带内土壤的苯磺隆残留量,而坡度和坡位的影响却不明显。

降雨后,苯磺隆残留量在土壤中的垂直分布也有

显著变化,草篱处理和土层深度有显著的交互作用(图 3,表 2)。无草篱区域的土壤苯磺隆残留量随土层深度的增加而降低,且 0~5、5~10、10~15 cm 三个土层间差异显著,苯磺隆主要滞留于表层(0~5 cm)土壤中,这表明该处理苯磺隆残留纵向迁移过程进行缓慢。农药在土壤中的滞留与土壤有机质含量、粘土含量、pH 值等特性关系密切,就苯磺隆而言,pH 值的影响最为显著^[27]。土壤吸附作用会随 pH 降低而增强^[28],因此该除草剂在中性或酸性土壤中的迁移性不及在碱性土壤中。草篱带内土壤苯磺隆残留量在 3 个土层间比较接近,残留向更深层次土壤迁移的趋势比较明

显。在有草木樨草篱和狼尾草草篱分布的土壤中,植物根系使土壤中形成了发达的垂直型与水平型根孔系统,改变了土壤的物理结构,形成物质传输的优先通道^[29],促进了水分下渗,从而增加了较深层苯磺隆的残留量,这种作用狼尾草比草木樨表现得更为突出。尽管苯磺隆在土壤中可以下渗,但由于其用量低($3\sim 40\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$)、在土壤中的半衰期短($1\sim 10\text{ d}$),流失量不及施用量的0.5%,污染地下水的风险极低^[30]。

2.3 试验因素与土壤含水量和苯磺隆残留量的回归分析

雨强、草篱、坡位、坡度和土壤深度等因素均影响土壤含水量和苯磺隆残留量,但影响程度各不相同。为进一步定量分析土壤含水量、苯磺隆残留量与各影响因子之间的关系,揭示各因素对坡地苯磺隆残留迁移行为的贡献,分别以土壤含水量和苯磺隆残留量为因变量,以草篱、雨强、坡度、坡位和土层深度为自变

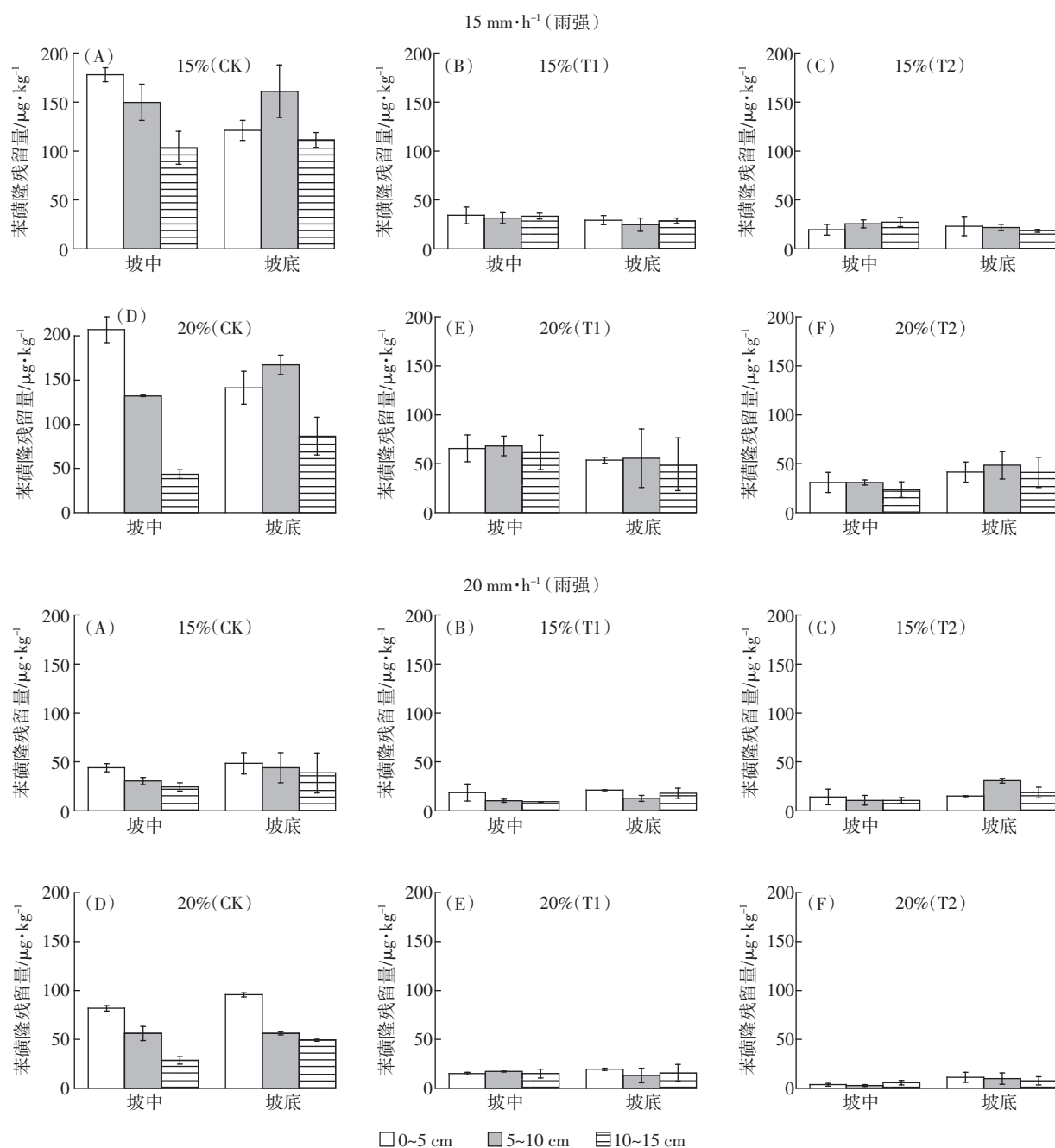


图3 不同雨强和坡度条件下的土壤苯磺隆残留量

Figure 3 Tribenuron-methyl residues in soil of sloping cropland under different rainfall intensities and slope gradients

量,进行最优尺度回归分析。由回归方程的决定系数(R^2)、 P 值可以看出,土壤含水量和苯磺隆残留量关于这些因素的最优尺度回归分析是有意义的。由表3可以看出,草篱、雨强和土层深度3因素对土壤含水量均有显著影响($P<0.05$),其中雨强的影响最大(回归系数0.867,重要性为0.926),其次为土层深度,最后是草篱,而坡度和坡位对土壤含水量无显著影响($P>0.05$)。这与表2中的方差分析结果是一致的。对于土壤苯磺隆残留量而言,依据回归系数和重要性值,各因子的影响程度从大到小依次为草篱>雨强>土壤含水量>土层深度>坡度>坡位,仅坡位的影响未达到显著水平(表3)。由此可见,草篱对本研究中坡地土壤苯磺隆残留迁移和分布的影响重要性已超过坡度和雨强,成为影响残留迁移动态特征的首要因素。据此推断,草篱对农药残留的水平扩散和纵向淋溶的影响更为关键,合理利用等高草篱技术可以有效控制农药残留流失。喷施的除草剂,除了一部分挥发、光解或吸附于地上植被外,残留部分主要集中于表层土壤中。农药在土壤中扩散主要有两种形式,一种是农药分子不规则运动引起的横向迁移,另一种是土壤中农药受流水或重力作用产生的下渗过程,而后一种形式是土壤中农药扩散的主要模式^[3]。本研究中苯磺隆喷施于小麦田后,其水平迁移的规模和数量均较小,而纵向迁移则起主导作用。苯磺隆在土壤中的纵向迁移是一个逐步发展的过程。首先,持留于表层(0~5 cm)土壤中的苯磺隆随入渗的水分向较深层次扩散,形成苯磺隆含量随深度递减的变化趋势;随着扩散过程的进行,浅层(0~15 cm)土壤中苯磺隆的分布渐趋均匀,其含量随深度无明显变化;而后,由于入渗水分的携带,表层土壤中苯磺隆的含量进一步降低,表现为苯磺隆在次表层(5~10 cm)土壤中的积聚;最后,随着水分入渗过程的继续,苯磺隆进一步向下迁

移,其含量呈现随深度而递增的变化趋势。此后,如果继续有水分补充,随着入渗过程的延续,苯磺隆将透过犁底层向更深层次的土壤迁移,直至进入地下水体。因此,本试验中水分作为苯磺隆发生空间迁移的载体作用体现得较为明显。降雨后,土壤内部孔隙水分流动带动土壤中苯磺隆迁移,从而呈现出苯磺隆残留不同深度土层的分布特征。此外,苯磺隆残留随水分纵向迁移过程中,植物根系吸收、土壤颗粒吸附和微生物降解等对残留量均有一定程度的影响,这有待进一步研究。

3 结论

华北地区坡地施用苯磺隆防治冬小麦田杂草,由于春季降雨少土壤含水量低,降雨后农药残留在坡耕地土壤中主要体现为纵向迁移,无明显的水平移动,亦无残留水平输出的地表径流产生,向毗邻水体扩散的生态风险较低。

草篱通过拦截水分的水平移动,促进苯磺隆残留随水分下渗。这种作用狼尾草比草木樨更为突出。草篱带内各土层苯磺隆的残留水平接近,而对应坡位的无草篱区域土壤表层(0~5 cm)苯磺隆残留量显著高于其他层,亦高于草篱带内的表层土壤。雨强显著影响浅层土壤(0~15 cm)的苯磺隆残留量,20 mm·h⁻¹雨强条件下的残留量显著低于15 mm·h⁻¹雨强,而坡度和坡位的影响不明显。

草篱、雨强以及坡度都是影响土壤苯磺隆残留迁移的主要因素,但草篱的重要性超过坡度和雨强,成为影响残留纵向迁移行为的首要因素。

参考文献:

[1] Polati S, Bottaro M, Frascarolo P, et al. HPLC-UV and HPLC-MSⁿ multiresidue determination of amidosulfuron, azimsulfuron, nicosul -

表 3 土壤含水量、苯磺隆残留量与各因素的回归分析
Table 3 Regression of soil water content and tribenuron-methyl residues with related factors

影响因素	土壤含水量					土壤苯磺隆残留量				
	回归方程		回归系数	P	重要性	回归方程		回归系数	P	重要性
	R^2	P				R^2	P			
草篱	0.811	<0.001	0.104	0.010	0.013	0.840	<0.001	0.676	<0.001	0.557
雨强			0.867	<0.001	0.926			-0.505	<0.001	0.342
坡度			-0.073	0.187	0.007			0.130	0.013	0.022
坡位			0.038	0.328	0.002			0.073	0.566	0.007
土层深度			-0.205	<0.001	0.052			-0.121	0.043	0.015
土壤含水量			—	—	—			0.134	0.009	0.057

- furon, rimsulfuron, thifensulfuron methyl, tribenuron methyl and azoxystrobin in surface waters [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 579(2): 146–151.
- [2] 李淑梅, 盛东峰, 许俊丽. 苯磺隆除草剂对农田土壤动物影响的研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1369–1371.
LI Shu-mei, SHENG Dong-feng, XU Jun-li. Effects of tribenuron-methyl herbicide on soil animal in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1369–1371.
- [3] 王正贵, 封超年, 郭文善, 等. 除草剂苯磺隆对麦田土壤酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 391–394.
WANG Zheng-gui, FENG Chao-nian, GUO Wen-shan, et al. Effects of tribenuron-methyl on soil enzymes activities in wheat field[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 391–394.
- [4] 张健, 杜慧玲, 洪坚平. 苯磺隆、尿素、多效唑对土壤微生物的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2007, 27(1): 58–61.
ZHANG Jian, DU Hui-ling, HONG Jian-ping. Influence of HER, urea, tribenuron-methyl on soil microorganisms[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2007, 27(1): 58–61.
- [5] 陈林梅, 孙青, 陈玲, 等. 几种典型除草剂对冬麦田 N_2O 排放及其相关土壤生化因子的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1450–1459.
CHEN Lin-mei, SUN Qing, CHEN Ling, et al. Effects of herbicides on N_2O emissions and soil biochemical parameters in winter-wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1450–1459.
- [6] 孙青, 史淳星, 石坤, 等. 添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1994–1999.
SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, et al. Effects of typical herbicides on soil respiration and N_2O emissions from soil added with different nitrogen fertilizers[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 1994–1999.
- [7] Duman F, Urey E, Temizgul R, et al. Biological responses of a non-target aquatic plant (*Nasturtium officinale*) to the herbicide, tribenuron-methyl[J]. *Weed Biology and Management*, 2010, 10(2): 81–90.
- [8] Baghfalaki M, Shalvei F, Hedayati A, et al. Acute toxicity assessment of tribenuron-methyl herbicide in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), common carp (*Cyprinus carpio*) and caspian roach (*Rutilus rutilus caspius*) [J]. *Global Veterinaria*, 2012, 8(3): 280–284.
- [9] Tang X, Zhu B, Katou H. A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: Processes and mitigation strategies [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3): 351–361.
- [10] Xiao B, Wang Q H, Wang H F, et al. The effects of grass hedges and micro-basins on reducing soil and water loss in temperate regions: A case study of Northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122(118): 22–35.
- [11] 喻定芳, 戴全厚, 王庆海, 等. 北京地区等高草篱防治坡耕地水土流失效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 89–96.
YU Ding-fang, DAI Quan-hou, WANG Qing-hai, et al. Effects of contour grass hedges on soil and water losses of sloping cropland in Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 89–96.
- [12] 喻定芳, 戴全厚, 王庆海, 等. 北京地区等高草篱防治坡耕地水土及氮磷流失效果研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 11–15.
YU Ding-fang, DAI Quan-hou, WANG Qing-hai, et al. Effects of contour grass hedges on soil, water and N, P nutrients loss on sloping croplands in Beijing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 11–15.
- [13] 李霞, 陶梅, 肖波, 等. 免耕和草篱措施对径流中典型农业面源污染物的去除效果[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 221–224.
LI Xia, TAO Mei, XIAO Bo, et al. Effects of grass hedges and no-tillage practice on the removing of typical agricultural non-point source pollutants from runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 221–224.
- [14] 林庆祺, 蔡信德, 王诗忠, 等. 植物吸收、迁移和代谢有机污染物的机理及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 661–667.
LIN Qing-qi, CAI Xin-de, WANG Shi-zhong, et al. Uptake, translocation and metabolism of organic pollutants by plants: Mechanisms and affecting factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 661–667.
- [15] 郎印海, 蒋新, 赵其国, 等. 磺酰脲除草剂在土壤中的环境行为研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1187–1190.
LANG Yin-hai, JIANG Xin, ZHAO Qi-guo, et al. Advances in researches of environmental behavior of sulfonylurea herbicides in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1187–1190.
- [16] 肖波, 王慧芳, 王庆海, 等. 坡耕地上等高草篱的功能与效益综合分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1318–1329.
XIAO Bo, WANG Hui-fang, WANG Qing-hai, et al. Functions and cost benefits of contour grass hedges on sloping croplands[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(7): 1318–1329.
- [17] 白志坚, 罗进儒, 周玉林, 等. 草木樨在水土保持中的作用[J]. 土壤, 1960(4): 18–25.
BAI Zhi-jian, LUO Jin-ru, ZHOU Yu-lin, et al. Function of *Melilotus* in soil and water conservation[J]. *Soils*, 1960(4): 18–25.
- [18] Xiao B, Wang Q H, Wu J Y, et al. Protective function of narrow grass hedges on soil and water loss on sloping croplands in Northern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 653–664.
- [19] 石伶俐, 陈福良, 郑斐能, 等. 喷雾助剂对三唑磷在水稻叶片上沉积量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4228–4233.
SHI Ling-li, CHEN Fu-liang, ZHENG Fei-neng, et al. The Influence of triazophos deposition on rice leaves by adding spray adjuvants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12): 4228–4233.
- [20] 秦曙, 乔雄梧, 朱九生, 等. 土壤中残留苯磺隆的高效液相色谱分析[J]. 环境化学, 1997, 16(2): 119–121.
QIN Shu, QIAO Xiong-wu, ZHU Jiu-sheng, et al. Residual analysis of tribenuron-methyl in soils by HPLC[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(2): 119–121.
- [21] Agus F, Cassel D K, Garrity D P. Soil-water and soil physical properties under contour hedgerow systems on sloping oxisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 40(3/4): 185–199.
- [22] 黎建强, 张洪江, 程金花, 等. 长江上游不同植物篱系统的土壤物理性质[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 418–424.
LI Jian-qiang, ZHANG Hong-jiang, CHENG Jin-hua, et al. Soil physical properties of different hedgerow systems in upper reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):

- 418-424.
- [23] 孙 辉,唐 亚,赵其国,等. 干旱河谷区坡耕地等高植物篱种植系统土壤水分动态研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):84-87, 103.
SUN Hui, TANG Ya, ZHAO Qi-guo, et al. Study on dynamics of soil moisture under contour hedgerow system in dry valley area of Jinsha River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1):84-87, 103.
- [24] 李 毅,邵明安. 雨强对黄土坡面土壤水分入渗及再分布的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12):2271-2276.
LI Yi, SHAO Ming-an. Effects of rainfall intensity on rainfall infiltration and redistribution in soil on Loess slope land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12):2271-2276.
- [25] 马有宁,朱国念,付 岩,等. 模拟条件下三唑磷在稻田中的分布、迁移、消解及相关环境因子的影响[J]. 农药学报, 2012, 14(6):635-640.
MA You-ning, ZHU Guo-nian, FU Yan, et al. Distribution, movement and dissipation of triazophos in rice plant and the impact of related environmental factors through the simulated experiments[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2012, 14(6):635-640.
- [26] 吴 磊,马孝义,刘 霞. 三峡库区柑橘果林地农药面源污染分布与运移特征[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3):12-16, 67.
WU Lei, MA Xiao-yi, LIU Xia. Distribution and migration characteristics of pesticide non-point source pollution in an orange field of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3):12-16, 67.
- [27] Weber J B, Wilkerson G G, Reinhardt C F. Calculating pesticide sorption coefficients (K_d) using selected soil properties[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(2):157-166.
- [28] Riise G. Association of tribenuron-methyl with colloidal and particulate materials[J]. *Science of the Total Environment*, 1994, 152(1):91-99.
- [29] 王 蓓,张 旭,李广贺,等. 芦苇根系对土壤中石油污染物纵向迁移转化的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(8):1281-1287.
WANG Bei, ZHANG Xu, LI Guang-he, et al. Impact of reed roots on the vertical migration and transformation of petroleum in oil-contaminated soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(8):1281-1287.
- [30] Cessna A J, Elliott J A, Bailey J. Leaching of three sulfonylurea herbicides during sprinkler irrigation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(1):365-374.
- [31] 肖春艳,邵 超,赵同谦,等. 降雨中有机氯农药土壤-水界面迁移过程的实验模拟[J]. 环境化学, 2012, 31(12):1953-1959.
XIAO Chun-yan, TAI Chao, ZHAO Tong-qian, et al. Transport of organochlorine pesticides between the interface of soil and water by rainfall simulation method[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(12):1953-1959.