

谷子冠层下的土壤溅蚀速率特征

马波, 吴发启, 马璠

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为研究种植谷子(*Setaria italica Beauv*)条件下农地土壤溅蚀速率的变化特征, 评价谷子冠层对土壤溅蚀的影响, 采取室内模拟降雨手段, 利用溅蚀杯法分别测定了叶面积指数为 0.86、1.54、2.18 和 3.11 四个生长阶段的谷子冠层下以及裸地上的溅蚀速率。谷子冠下溅蚀速率测定的设计雨强为 40 mm/h 和 80 mm/h, 裸地试验的设计雨强为 20、40、60、80、100、120 mm/h 及 140 mm/h。试验结果表明: 与裸地相比, 在各生长阶段, 谷子冠下的平均溅蚀速率在 40 mm/h 雨强下平均降低 24%, 在 80 mm/h 雨强下降低约 52%, 特定条件下冠下溅蚀速率会高于相同雨强下裸地的溅蚀速率; 冠下平均溅蚀速率的变化与冠层发育之间的关系不明显; 谷子冠下各地点的溅蚀速率与该地点对应的冠下雨强之间的关系不显著, 而裸地上溅蚀速率与雨强之间呈幂函数相关关系。

关键词: 谷子; 作物冠层; 溅蚀速率; 降雨强度; 模拟降雨

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)01-0130-06

溅蚀是指雨滴打击土壤表面, 使土壤颗粒发生分散、分离、跃迁位移的过程^[1], 是土壤侵蚀发展的最初阶段。土壤被溅散后, 成为孤立的土粒, 更容易被坡面径流搬运出地块; 溅蚀还能夯实表土, 阻止雨水入渗, 增加地表径流紊动, 增强径流的侵蚀和搬运能力^[2]。因此, 溅蚀是土壤侵蚀过程的重要组成部分, 历来为研究人员所重视。然而, 有关溅蚀的研究大部分是在裸地上进行的, 针对作物植被冠下溅蚀的研究并不多。作物能对输入其冠层的降水进行再分布^[3], 并引起雨滴大小和能量的改变^[4-6], 进而强烈影响其冠下的溅蚀。早在 1947 年, Sreenivas 等^[7]用埋入式收集装置测定溅蚀, 结果显示牧草作物能相当好地防止溅蚀。然而粮食作物并非如此, Morgan^[8]研究了谷类作物对溅蚀的影响, 发现相对于低强度降雨下, 植被在高强度降雨下对土壤的保护作用更好, 并提出作物植被对溅蚀影响的复杂性是由于冠层对降雨特征的改变。后来, Morgan^[9]对玉米和大豆冠下的溅蚀研究表明, 玉米冠下溅蚀随冠层覆盖增加而增加, 大豆则相反, 并指出经作物冠层改变后的雨滴比天然雨滴更能引起溅蚀。Finney^[10]用溅蚀杯法测定了几种蔬菜冠下不同位置的溅蚀速率, 进一步说明了作物冠层的存在导致降雨和溅蚀间的关系变得复杂。目前, 有关主要农作物冠下溅蚀速率的大小、空间分布, 以及溅蚀与冠下雨强特征之间的关系研究还比较少。

谷子(*Setaria italica Beauv*)生育期短, 适应性广, 耐干旱和贫瘠, 是中国北方地区重要的粮食作物。但无论是春播还是夏播, 其生育期都要经过降雨丰沛, 存在着一定的土壤侵蚀危险的季节; 深入研究种植谷子条件下, 土壤溅蚀速率的特征, 对坡耕地的土壤侵蚀防治具有重要指导意义。本研究的目的是比较不同生长阶段的谷子在不同的降雨强度下, 其冠下的溅蚀速率与裸地的差异, 分析冠下溅蚀速率与冠下雨强强度的关系以及冠下溅蚀速率的空间分布特征。

1 材料与与方法

1.1 溅蚀速率的测定方法

本研究采用溅蚀杯法^[6]测定溅蚀速率。溅蚀杯用镀锌铁皮制成, 呈圆柱形, 直径 7 cm, 深 5 cm, 杯底有 10 个直径为 4 mm 的小孔, 用于水的自由渗漏。将种植谷子的小区内的表层土壤过 5 mm 筛后, 以 105℃ 烘干至恒重, 然后装入杯底垫有滤纸的溅蚀杯, 称取溅蚀杯和土壤总质量, 在实验室内放置 24 h 后用于溅蚀测定; 降雨完成后再将土壤连同溅蚀杯烘干至恒重, 称取其总质量, 与降雨前杯土总质量相减得到单杯溅蚀量, 然后除以溅蚀杯口面积和降雨历时计算溅蚀速率, 单位为 $g/(m^2 \cdot h)$ 。

1.2 谷子冠层的室内模拟

为更好地控制试验条件, 本研究采取将谷子植

收稿日期: 2008-10-14

基金项目: 国家“973”计划项目(2007CB407201-5)

作者简介: 马波(1982—), 男, 陕西汉中人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: mabo_916@126.com.

通讯作者: 吴发启(1957—), 男, 陕西黄陵人, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀及流域管理研究。E-mail: wufaqi@263.net.

株移至室内进行模拟降雨的试验方法,所用谷子种植于紧邻西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验室的 10 块 1 m × 3 m 的小区内,土壤为杨凌地区常见的瘠土。播前按 50 000 kg/hm² 的有机肥料(腐熟羊粪)和 600 kg/hm² 的磷酸二铵施底肥一次。谷子品种为晋谷 29 号,2008 年 5 月 10 日按 20 cm 行距条播,因小区长 3 m,故每个小区播种 15 行,作物行与各小区短边平行。在 3 叶期后按株距 10 cm 的密度间苗,即小区内每一行留苗 9 株。

在谷子进入拔节期后,每 5 天在所有小区内随机选取 10 株谷子,剪下所有叶片用复印剪纸称重法^[11]测定叶面积,以监测谷子整体长势。当估计平均单株叶面积达到约 150、300、450 cm² 及 600 cm² 四个阶段时,各随机选取某小区中连续的 3 行,将 27 株谷子齐地面剪下,用透明胶布固定在图 1 所示的铁架上,每一植株在铁架上的位置、叶片方位及株高与切割前在小区的状态一致。铁架底框用角钢焊接而成,长 2 m,宽 1 m;在其两个长边上固定了 3 根钢筋,间距 20 cm,钢筋上每隔 10 cm 竖直朝上焊接一根铁钉,植株便固定在这些铁钉上。这样,3 行植株由小区移至室内,模拟了其在田间的状态。在溅蚀速率测定完成后,用长宽比例法^[11]测定各植株叶面积,计算叶面积指数。

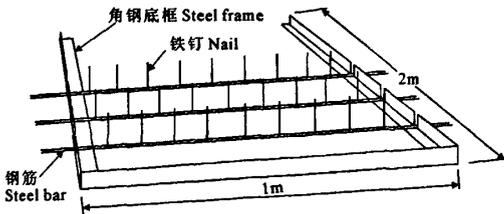


图 1 植株固定铁架示意图
Fig.1 The iron frame for plants fixation

1.3 降雨溅蚀试验

本研究所用降雨设备为室内下喷式降雨机,雨滴下落高度 4 m。分别进行谷子冠下溅蚀试验和裸地对照溅蚀试验。

1.3.1 谷子冠下溅蚀试验 将 1.2 所述的模拟冠层置于降雨机下,按图 2 所示的位置放置口径与溅蚀杯一致的雨量筒 32 个,调节降雨机至设计雨强后,开机降雨 30 min,测定各点冠下穿透雨的降雨强度。雨强测定完成后,取走雨量筒,将准备好的 32 个溅蚀杯放在与雨量筒相同的位置,再次开机降雨 30 min,测定各点的溅蚀速率。然后调节降雨机至另一设计雨强,更换溅蚀杯,重复上述过程;冠下溅蚀测定的设计雨强为 40 mm/h 和 80 mm/h。冠下溅

蚀杯分为两组,每组 16 个,作为重复处理分别置于两个相邻的行间区域。

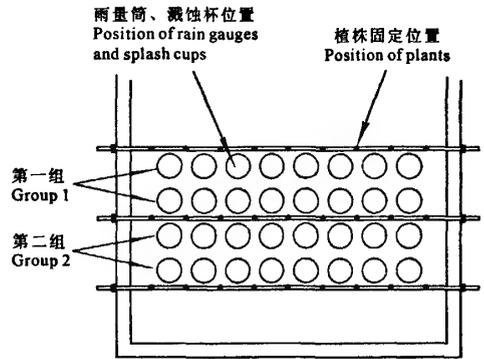


图 2 雨量筒和溅蚀杯在谷子冠下的位置示意图
Fig.2 Positions of rain gauges and splash cups under millet canopy

1.3.2 裸地对照溅蚀试验 裸地试验时,溅蚀杯按图 2 中一个行间组的位置摆放,数量为 16 个。每一个设计雨强的降雨过程与有冠层条件下的过程相似,先降雨 30 min,测定各点实际雨强,再降雨 30 min,测定溅蚀速率。设计雨强为 20、40、60、80、100、120 mm/h 及 140 mm/h。

2 结果与分析

2.1 谷子冠下及裸地上的平均溅蚀速率

谷子冠下以及裸地上的平均雨强和平均溅蚀速率分别列于表 1 和表 2。由表 1 可以看出,由于谷子冠层对降雨的再分配作用,一部分降雨转化为茎秆流和冠层截留,冠下穿透雨的平均雨强小于冠上设计雨强;就 4 个生长阶段的平均情况而言,冠下平均雨强与冠上雨强的比例在 40 mm/h 和 80 mm/h 设计雨强下分别约为 86% 和 75%。冠下降雨的改变必然引起溅蚀速率的变化,各轮试验中,在 40 mm/h 设计雨强下,冠下的溅蚀速率约为裸地对照的 47% ~ 120%,平均 76%;在 80 mm/h 设计雨强下,上述比例约为 34% ~ 58%,平均 48%。与裸地对照相比,冠下平均溅蚀速率的减小幅度大于平均雨强的减小幅度,这说明谷子冠层对溅蚀速率和雨强的影响不服从简单的比例关系。较大设计雨强下,冠下平均溅蚀速率的减小幅度更大,意味着冠层在大强度降雨时对土壤的保护作用相对强于低强度降雨时的状况,这与 Morgan^[8]的研究结论基本一致。随着冠层的生长,冠下平均溅蚀速率的变化没有明显规律,如在最后一轮试验(LAI = 3.11)的第一组中,40 mm/h 设计雨强下的冠下平均溅蚀速率为 514.49 g/(m²·h),超过了裸地对照值,与溅蚀速率随冠层覆盖发育而降低的常理推

断并不相符。但事实上,作物冠下溅蚀速率高于裸地是可能的,如 Morgan^[9]在玉米冠下发现了这一现象,这是由于作物冠层会产生一部分侵蚀能力较强的大直径雨滴^[4],使某些条件下(如玉米那样的高冠层)的冠下局部地点发生强烈的溅蚀,从而使平均溅蚀速率高于裸地。本研究表明这样的现象也可能出现在谷子冠下,然而该现象仅在一组试验中出现,与之相邻的行间区域的平均溅蚀速率[225.74 g/(m²·h)]则远低于裸地,说明该现象在谷子冠下可能只是偶尔出现的,也说明了谷子冠下溅蚀速率变化的随机性。冠下两组重复试验之间的平均溅蚀速率差异较大,有的甚至相差一倍以上(第四轮 40 mm/h 雨强条件

下),而冠下平均雨强差异相对较小,表明即使相邻的两个行间区域的溅蚀速率差异也很大,这也说明谷子冠下溅蚀速率变化的随机性。

雨强和溅蚀速率的变异系数(CV)表示这两个量在地面上各点之间的差异程度。冠下雨强的 CV 在 0.28 至 0.52 之间,而冠下溅蚀速率的 CV 在 0.65 至 1.34 之间,很明显冠下溅蚀速率的空间分布更加不均匀。由于没有冠层干扰,裸地上雨强的 CV 自然较小,然而裸地上溅蚀速率的 CV 也明显大于雨强的 CV。以上数据表明,溅蚀速率的空间变异比降雨强度的变异大,说明雨强与溅蚀速率之间的关系较为复杂。

表 1 谷子冠下平均雨强和平均溅蚀速率

Table 1 Average rainfall intensity and detachment rate under millet canopy

组别 Group	冠上设计雨强 Designed rainfall intensity (mm/h)	冠下平均雨强 Average intensity under canopy (mm/h)	冠下雨强 CV* CV of rainfall intensity under canopy	平均溅蚀速率 Average detachment rate [g/(m ² ·h)]	溅蚀速率 CV CV of detachment rate under canopy	叶面积指数 LAI
第一组 Group 1	40	32.3	0.41	302.72	1.34	0.86
	80	63.1	0.34	887.05	0.87	
第二组 Group 2	40	31.8	0.38	199.11	1.06	
	80	61.6	0.28	1123.83	0.96	
第一组 Group 1	40	35.2	0.45	373.53	1.05	1.54
	80	60.4	0.38	1043.93	1.09	
第二组 Group 2	40	38.7	0.47	387.49	0.86	
	80	59.8	0.35	672.34	0.87	
第一组 Group 1	40	35.8	0.44	349.82	1.26	2.18
	80	58.5	0.40	951.68	0.90	
第二组 Group 2	40	32.8	0.46	252.69	0.98	
	80	57.9	0.42	1008.85	1.11	
第一组 Group 1	40	34.4	0.52	514.49	1.10	3.11
	80	56.7	0.30	762.00	0.65	
第二组 Group 2	40	33.7	0.38	225.74	0.87	
	80	61.5	0.27	994.23	0.66	

注 Note: * CV(Coefficient of variation):变异系数(n=16)。表 2 同。They are the same in table 2.

表 2 裸地对照平均雨强与平均溅蚀速率

Table 2 Average rainfall intensity and detachment rate on bare ground

设计雨强 Design of rainfall intensity (mm/h)	实际平均雨强 Actual average rainfall intensity (mm/h)	实际雨强 CV CV of actual rainfall intensity	平均溅蚀速率 Average detachment rate [g/(m ² ·h)]	溅蚀速率 CV CV of detachment rate
20	20.1	0.030	50.35	0.94
40	38.8	0.024	427.12	0.76
60	59.3	0.012	1016.64	0.40
80	79.4	0.0083	1954.03	0.26
100	99.6	0.0086	3041.48	0.27
120	118.1	0.0076	5750.37	0.20
140	138.3	0.0052	8507.97	0.10

2.2 谷子冠下及裸地上雨强与溅蚀速率的关系

为了研究地面上各个点的雨强与溅蚀速率的关系,将每一个溅蚀杯测得的溅蚀速率与和它对应的降雨强度绘制散点图(图 3 和图 4)。在图 3 中可以看到,虽然冠上设计雨强只有 40 mm/h 和 80 mm/h 两个水平,但是由于冠层的影响,冠下各点的雨强变得不均匀,多次试验中冠下各点的雨强范围是 10 ~ 110 mm/h。图 3 和图 4 所呈现的冠下和裸地条件下,雨强和溅蚀速率的关系是截然不同的。冠下的雨强和溅蚀速率相关性不强,其线性回归方程的 R^2 值仅为 0.5423,而裸地上溅蚀速率与雨强呈明显的幂函数关系,这与前人的研究结果^[1]是一致的,回归方程的 R^2 值达到了 0.9087,且该方程经检验是极显著的 ($P < 0.001$)。图 3,图 4 所示回归关系表明,在本研究所采用的土壤和降雨条件下,裸露土壤的溅蚀速率可以通过雨强来估算,但是冠下溅蚀速率却无法通过冠下的雨强来准确预测。究其原因,是降雨经过冠层的拦截后,原来的雨滴或汇聚为大雨滴,或分散为小雨滴,并且不均匀地落下,冠下降雨所蕴含的侵蚀动能发生了极其复杂的空间再分布。冠下某些地点汇聚了较多的水量,雨强较大,但落在这些地点的雨滴不一定是侵蚀动能较大的大雨滴,或者即使是大雨滴,可能是从较低位置的叶片上落下的,侵蚀动能也不大,故溅蚀速率反而低一些;反之,某些地点虽然雨强较小,但接受到的雨滴可能多为从较高位置的叶片上落下的大雨滴,故溅蚀速率高一些。所以,冠下的溅蚀速率与冠下雨强的关系是不明显的,其空间分布也是不均匀和随机的。

2.3 谷子冠下雨强和溅蚀速率的空间分布

由表 1 可知各轮试验中,谷子冠下雨强和溅蚀速率的 CV 都较大,所以任选第三轮 ($LAI = 2.18$) 试验中 40 mm/h 设计雨强下得到的两组数据为例,直

观地说明谷子冠下雨强和溅蚀速率的空间分布状况,图 5 中棱锥的高度表示冠下各点的雨强或溅蚀速率大小。在冠下各点,雨强和溅蚀速率之间并无明显关系可言,最大的溅蚀速率并非由最大的雨强产生,某些较小的雨强却引起了相对较大的溅蚀速率。这更加直观地表明了图 3 所示的回归关系的低决定度。很明显,冠下溅蚀速率的空间分布是很不均匀的,也是很随机的。例如,最大的溅蚀速率超过了 $1\ 500\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而紧邻这一点的溅蚀速率却只有 $30\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右。这种不均匀性和随机性可能是由于谷子冠层对降雨产生的极其复杂的质量和能量再分布而引起的。

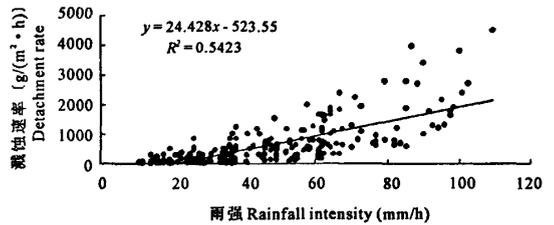


图 3 谷子冠下雨强与溅蚀速率关系 ($n = 256$)

Fig.3 Relationship between rainfall intensity and detachment rate under millet canopy ($n = 256$)

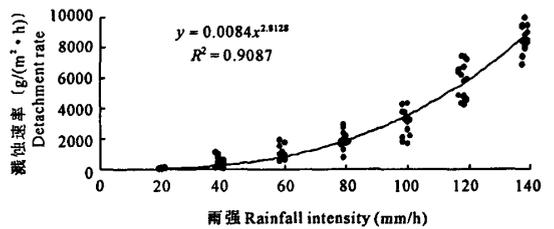


图 4 裸地上雨强与溅蚀速率的关系 ($n = 112$)

Fig.4 Relationship between rainfall intensity and detachment rate on bare ground ($n = 112$)

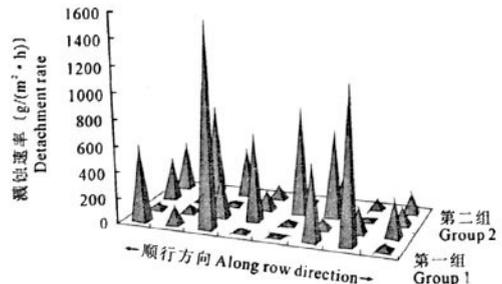
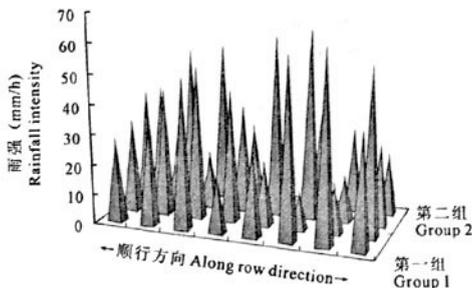


图 5 谷子冠下雨强和溅蚀速率空间分布 ($LAI = 2.18$, 设计雨强 40 mm/h)

Fig.5 Spatial distribution of rainfall intensity and detachment rate under millet canopy

($LAI = 2.18$, Designed rainfall intensity = 40 mm/h)

3 讨 论

作物植被的覆盖能在一定程度上减轻雨滴对土壤的击溅,减少溅蚀的发生。但就本研究所得的结果来看,谷子这种作物对土壤的保护作用是有限的。平均而言,谷子能将溅蚀速率降低 24%~52%,这样的保护效果显然是不够的;另外,本研究还显示谷子冠下溅蚀速率的空间分布很不均匀,也是没有明显规律的。某些地点的溅蚀速率大大超过平均值,少数地点的溅蚀量占冠下溅蚀总量的比例较大。溅蚀较强烈的区域会形成土壤结皮,阻止降水的人渗并增加径流,由此产生地表微形态的变化,形成一些小的坑穴,这些坑穴容易成为地表径流的集散地,并可能演变成为细沟的沟头。所以,冠下某些溅蚀速率极大的地点在坡面土壤侵蚀的发展过程中存在着相当大的隐患,即使降雨强度相对较小的情况下也是如此。控制谷子冠下极不规则的溅蚀危害的途径,一是增加地表覆盖物,减少溅蚀的发生,二是等高垄作,控制坡面径流,使得溅散土壤无法被径流搬运至他处。

溅蚀的发生是雨滴消耗其动能的做功过程,雨滴所蕴含的动能与溅蚀有最为密切的关系。若要进一步研究谷子以及其它作物冠下溅蚀,尤其是冠下溅蚀速率的空间变异,则需要细致研究植被冠层结构、冠下降雨的雨滴大小和下落高度,这样才能得出冠下不同区域接受到的降雨动能,进而得到有关冠下溅蚀的更基础、更一般的规律。

4 结 论

1) 谷子冠层对溅蚀有一定的削减作用。在不同的生长阶段,冠下的溅蚀速率在 40 mm/h 雨强下平均降低 24%,在 80 mm/h 雨强下降低 52%,大强度降雨条件下谷子冠层对土壤的保护作用相对小强度降雨条件下更好一些。某些情况下,谷子冠下溅蚀速率会高于相同雨强下裸地的溅蚀速率。

2) 谷子冠下各地点的溅蚀速率与该地点对应的冠下雨强之间没有较为显著的关系,显示了谷子冠层对降雨的侵蚀能力所产生的复杂的改变作用,而裸地上溅蚀速率与雨强之间有良好的幂函数相关关系。

3) 谷子冠下的溅蚀速率的空间分布不均匀且随机性很大。某些地点的溅蚀速率极大,可能会对土壤侵蚀过程产生复杂的影响。在种植谷子的条件下,必须重视农地的溅蚀防治。

参 考 文 献:

- [1] 郑粉莉,江忠善,高学田.水蚀过程与预报模型[M].北京:科学出版社,2008:48.
- [2] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1997:37—38.
- [3] 刘海军,康跃虎,王庆改.作物冠层对喷灌水分分布影响的研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):137—142.
- [4] Armstrong C L, Mitchell J K. Transformation of rainfall by plant canopy[J]. Transactions of the ASAE., 1987,30(3):688—696.
- [5] Armstrong C L, Mitchell J K. Plant canopy characteristics and processes which affect transformation of rainfall properties[J]. Transactions of the ASAE., 1988,31(5):1400—1409.
- [6] Moss A J, Green T W. Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants[J]. Australian Journal of Soil Research, 1987,25:9—20.
- [7] Sreenivas L, Johnston J R, Hill H O. Some relationship of vegetation and soil detachment in the erosion process[J]. Soil Science Society Proceedings, 1947,12:471—474.
- [8] Morgan R P C. Splash detachment under plant covers: results and implications of a field study[J]. Transactions of the ASAE., 1982,25(4):987—991.
- [9] Morgan R P C. Effect of corn and soybean canopy on soil detachment by rainfall[J]. Transactions of the ASAE., 1985,28(4):1135—1140.
- [10] Finney H J. The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984,29:337—343.
- [11] 冯冬霞,施生锦.叶面积测定方法的研究效果初报[J].中国农学通报,2005,21(6):150—155.

Characteristics of splash detachment rate under millet canopy

MA Bo, WU Fa-qi, MA Fan

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the characteristics of splash detachment rate under millet (*Setaria italica Beauv*) canopy compared to bare ground. The experiment was conducted using an indoor rainfall simulator. The detachment rate under millet canopy with different LAI from about 0.86 to 3.11 and on bare ground was measured using splash cups. The designed rainfall intensities of 40 and 80 mm/h were applied when detachment rate was measured under canopy, and intensities of 20, 40, 60, 80, 100, 120 and 140 mm/h were applied on bare ground. Compared to bare ground, the average detachment rate under millet canopy through growing season reduced by about 24% with designed rainfall intensity of 40 mm/h, and reduced by about 52% with intensity of 80 mm/h. The detachment rate under millet canopy might be higher than that on bare ground under certain conditions. There was no obvious relationship between changes of average detachment rate under millet canopy and canopy development. Under millet canopy, no significant relationship was found between the detachment rate at different positions and corresponding rainfall intensity at the same place, but on bare ground, there was a significant exponential relationship between detachment rate and rainfall intensity.

Keywords: millet; crop canopy; detachment rate; rainfall intensity; simulated rainfall

(上接第 121 页)

Dynamic characteristics of CO₂ release flux in Lou soil

XIA Fa-sheng, WANG Yi-quan, LIU Jun, XU Hai

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil CO₂ release flux was measured by Ca(OH)₂ solution method in Lou soil profile with long-term observation and survey. The results obtained in one year showed that the seasonal dynamics of soil CO₂ release flux in Lou soil profile was obvious and relatively complex, and its maximum value appeared in the last ten days of August, while the lowest in winter. The profile dynamics of soil CO₂ release flux in Lou soil was low to high to low from top to deeper. The seasonal and profile dynamics of soil CO₂ release flux in fallow field was similar to that in cultivated field, but dynamic extent and complex of that in cultivated field was more significant. Soil CO₂ release flux was significantly correlated with soil temperature, and could be described by power function ($P < 0.01$). Soil CO₂ release flux was correlated with soil moisture, but not so much as with soil temperature. There was most suitable soil moisture in soil CO₂ release flux and soil moisture, and it was more and more while the profile got deeper and deeper.

Keywords: Lou soil; profile; CO₂ release flux; soil temperature; soil moisture