

雨滴动能对红壤地表溶质迁移特性影响试验*

王辉 平李娜 沈紫燕 龚恩磊

(湖南农业大学工学院,长沙 410128)

摘要:以非吸附性溴离子和吸附性磷元素为示踪剂,通过改变针头式降雨器的雨滴降落高度获取不同雨滴动能,并推算其相应的雨滴能量流(Rain droplet energy flux, DE),研究雨滴动能对红壤坡面溶质迁移特征的影响。试验结果表明,初始产流时间、地表土壤含水率、土壤水分入渗深度等均随着DE增大而线性减小;径流总量(Total runoff, TR)与DE呈幂函数递增关系;产沙量(Sediment yield, SY)与DE可用对数函数描述。在不同雨滴动能条件下,径流溴离子浓度随产流时间呈幂函数衰减,土壤溴离子淋溶深度随着雨滴动能增大而减少;径流溶解态磷浓度随产流时间呈线性增大趋势,径流全磷(Total phosphorus, TP)流失总量与DE的关系可用指数函数描述,且径流全磷流失量与径流总量及产沙量高度相关;雨滴动能越大导致表层土壤磷素含量越低。

关键词:红壤坡面 雨滴能量 土壤侵蚀 溶质运移 地表径流

中图分类号: S153; S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0165-06

引言

农田大量化学物的释放与迁移既是经济损失,又是影响地表水体质量下降的重要原因之一。土壤溶质随地表径流迁移是一个复杂的物理与化学过程,受到诸多因素的影响^[1]。深入研究这些因素的内在影响机制是为了更好地理解与控制农田土壤溶质迁移过程。众多影响因素中,雨滴动能是最活跃的因子之一^[2]。具有一定能量的雨滴打击到裸露表土时,雨滴动能就会传递给表土颗粒并发生能量转化,引起土壤颗粒及大小团聚体的崩解、松散与剥离,在地表形成土壤溶质、泥沙与雨水的有效混合深度(Effective depth of interaction, EDI);雨滴能量大小直接影响雨滴打击、扰动作用强度,加速混合层内土壤化合物的解吸附过程^[3-5]。另一方面,雨滴击溅作用导致地表结皮发育,从而改变地表入渗特性^[6],抑制土壤溶质的释放和迁移,使地表土壤溶质迁移的路径和强度变得更为复杂。Ahuja等^[5]采用不同网孔密度筛网覆盖土壤表面来模拟不同能量雨滴,发现2种不同质地土壤坡面径流溶解态磷平均浓度随着土壤覆盖度增大或相对雨滴能量减少而线性减少。Sharpley^[7]采用100 kg/hm²麦秆覆盖和0.5 mm²筛网分别模拟土壤表面覆盖试验,发现有效混合深度(EDI)分别减少了73%和80%。Thompson等^[6]研究发现雨滴打击裸露地表降低了

土壤入渗特性,采用不同降雨强度换算成相应降雨动能来分析雨滴动能对土壤中溴离子迁移的影响,并首次建立了有、无覆盖条件下雨滴动能与径流溴流失的定量关系^[8]。王全九等^[9]通过改变雨滴降落高度获取不同雨滴能量水平的方法,发现降雨有效动能影响入渗-产流-钾素迁移整个过程,提出可通过消减到达地表雨滴的有效动能来降低径流钾素流失数量的措施。目前直接测定雨滴动能的手段和方法^[10]仍然有限,大多数学者^[11-13]试图建立降雨强度与雨滴能量的经验关系来研究雨滴能量对土壤物质迁移的影响。而直接测定雨滴动能并建立定量关系的相关研究较少,特别是针对红壤丘陵区域的研究鲜有报道。因此,本文以红壤丘陵岗地为研究背景,研究雨滴动能对坡地红壤溶质运移过程的影响,以期为该区防治水土流失、控制坡面溶质迁移、降低农业面源污染提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验在湖南农业大学水土工程模拟降雨室进行。为了便于观测雨滴动能,选用针头式模拟降雨器。试验土槽为移动式钢槽,其规格为1 m×0.3 m×0.3 m;降雨试验前,在土槽四周安装高于土面20 cm的塑料板围栏,避免泥水溅出土槽。土槽坡度可在0°~30°范围内以5°为步长调节。土槽底部均匀布

设小孔,以保证填装的土体具有良好的透水、透气性。试验所用土料来自湖南农业大学校园郊区周边耕地,采集0~20 cm耕层典型红壤,去除植物根系、石块等杂物后,过10 mm筛并风干,使其含水率均匀且接近12% (质量百分比),备用。从备用土壤中随机取5~10 kg土壤,运送到实验室供土壤基本理化特性分析。根据美国农业部土壤质地分组标准,供试土壤不同粒径的颗粒组成为砂粒(粒径大于0.05 mm)占21.15%,粉粒(粒径介于0.05~0.002 mm之间)占36.15%,粘粒(粒径小于0.002 mm)占42.7%;土壤质地属于黏壤土。土壤基本化学物组成为有机质质量比6.6 g/kg、全氮质量比0.53 g/kg、全磷质量比0.30 g/kg、全钾质量比13.53 g/kg。通过调节降雨器高度改变雨滴动能。试验设计5个雨滴降落高度,分别是0、0.7、1.0、2.5、4.0 m;通过采用土表铺设纱网,使雨滴透过纱网浸润土表,近似认为雨滴降落高度为零。5个不同雨滴降落高度下的降雨动能大小分别为0、0.47、0.65、1.34和1.80 J/m² (表1)。其计算方法及过程见2.2节所述。试验设计降雨强度均为76 mm/h,降雨历时均为60 min,每个处理重复3次,取算术平均值进行计算与分析。为了防止模拟降雨雨水中所携带的化学物质影响试验结果,特别是避免模拟雨水中溶解的空气和杂质等堵塞降雨器的针头导致降雨强度发生改变,因此所有模拟降雨试验采用蒸馏水作为模拟降雨用水。

表1 不同降落高度下雨滴动能相关计算参数

Tab.1 Kinetic energy parameters of raindrop under different falling height

高度/ m	速度/ (m·s ⁻¹)	单个雨滴动能/ J	总动能/ (J·m ⁻²)	雨滴能量流/ (W·m ⁻²)
0	0	0	0	0
0.7	3.53	1.16 × 10 ⁻⁷	0.47	1.32 × 10 ⁻⁴
1.0	4.14	1.60 × 10 ⁻⁷	0.65	1.81 × 10 ⁻⁴
2.5	5.95	3.30 × 10 ⁻⁷	1.34	3.73 × 10 ⁻⁴
4.0	6.88	4.42 × 10 ⁻⁷	1.80	5.00 × 10 ⁻⁴

1.2 试验过程与方法

填土前在土槽底部铺上棉质纱布,以保证土壤样品良好的透水、透气性。为了保证土体容重均匀,以10 cm为一层,分层填装30 cm土体。填装时通过称量控制容重为1.1 g/cm³,层与层之间用工具刮平并打毛,避免土体出现分层现象。填土时采用边填充边压实的方法,以减小土槽边壁效应的影响。通常室内或野外人工降雨试验所采用的水源来自市政供水水源或试验区附近未经处理的地表水源,其硝态氮浓度的本底值较高,且随着季节气温的变化而变化;另一方面,溴离子(Br⁻)在土壤和水中含量

极低,化学性质相对稳定,且与硝态氮在土壤-水系中运移规律类似^[14]。因此,溴离子成为研究土壤溶质运移规律中常用且可靠的示踪剂。为了保证施肥均匀性,采用干拌法进行培肥、施肥,即称取一定量土壤和一定量KBr和KH₂PO₄,溴质量比控制为2000 mg/kg,磷质量比控制为600 mg/kg,充分搅拌、混合后,静止培养12 h;将培好肥料的土壤均分为4等份,分别均匀施撒在均分为4等份的槽内土面上。

每次模拟降雨试验之前,调试降雨强度至预设范围内。试验开始后,观测坡面产流情况,记录产流时间;根据径流强度大小间隔不定时间,用塑料小桶承接径流样品1 min,其余径流全部用径流大桶收集。试验结束后,每5 cm为一层,及时分层取土样。采用称量法换算出径流量,取一部分径流样过滤澄清,供化学成分分析。水样和土样化学测定内容包括溴离子(Br⁻)、水溶性磷(DP)、全磷(TP)和速效磷(Available P, AP)。溴离子采用溴离子选择性电极结合离子计法测定,水溶性磷采用钼蓝比色-紫外分光光度法测定,全磷采用过硫酸钾消解-钼蓝比色法测定。土壤溴离子采用蒸馏水浸提-震荡-溴离子计法测定,速效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定。每次取样3次重复,取算术平均值作为计算与分析结果。采用SPSS软件进行影响因素显著性方差分析。

2 模拟雨滴动能的计算

2.1 雨滴直径率定

针头式模拟降雨器突出特点是降雨强度均匀性好且可调、雨滴分布均匀、雨滴直径大小分布均匀且容易控制,便于雨滴动能定量化。该类型降雨器所形成的雨滴直径大小与针头直径关系密切。为了筛选出能够形成代表南方地区天然降雨雨滴直径的针头,选用4、5、6、7、8号等不同直径针头进行雨滴直径率定。每次雨滴直径率定过程,随机抽取10个相同型号针头,重复测定10次。每次测定方法如下:雨滴降落高度控制在1 m左右,采用10 mL的量筒,承接100滴雨滴,记录其总体积,进而换算出单个雨滴直径;最后取多组数据的平均值作为该号针头所形成的雨滴直径。经率定,8号针头形成的雨滴直径平均为3.29 mm,符合天然降雨雨滴直径范围^[15]且雨滴形成的速度适中。因此,本试验选定8号针头作为模拟降雨器的雨滴生成器。

2.2 雨滴动能确定

Thompson和James^[6]研究发现土壤表面结皮与雨滴动能(Droplet kinetic energy, KE)关系密切,在

引入降雨强度后,雨滴对土壤表面冲击影响采用雨滴能量流 DE 表达更合适。雨滴动能 KE 和能量流 DE 表示为^[8]

$$K_E = \frac{\rho_w}{2} H t V_i^2 \quad (1)$$

$$D_E = \frac{\rho_w}{2} I V_i^2 \quad (2)$$

式中 K_E ——雨滴动能, J/m^2

D_E ——雨滴能量流, W/m^2

ρ_w ——水密度, kg/m^3

I ——降雨强度, m/s t ——降雨历时, s

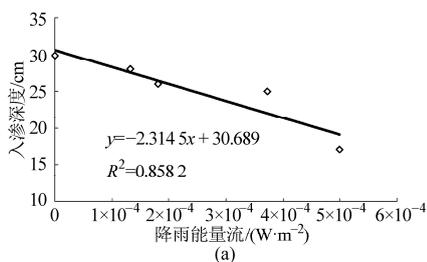
V_i ——雨滴到达地表时刻的速度, m/s

由于最高雨滴降落高度为 4.0 m, 本试验设计的雨滴落地速度均达不到雨滴终速, 因此采用姚文艺等^[16]推导的公式, 推算出不同降落高度雨滴落地速度。根据雨滴动能 KE 和雨滴能量流 DE 的概念, 结合针头式降雨器特征, 推算出 8 号针头形成的单个雨滴体积, 并根据降雨强度 I 、降雨高度 H 、降雨历时 t 推算出单个雨滴动能、总动能以及能量流 DE 。其计算结果如表 1 所示。

3 结果与分析

3.1 雨滴动能对红壤表层土壤水分运动和径流特征的影响

建立雨能量流 DE 与土壤表层含水率、入渗深度的关系如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 随着雨滴动能的增大, 入渗深度和土壤表层含水率均呈线性减小的趋势。可见, 雨滴打击力能夯实土表和粉碎土粒, 细颗粒遭到粉碎后随入渗水进入表层土壤孔隙, 使土表变得密实, 入渗水随之减少, 表层积水增多。雨滴动能对土壤水分入渗深度影响显著, 雨滴动能越大, 湿润锋离地表距离越小(图 1a); 降雨高度为 0 m 时入渗深度最大, 土槽底部部分土壤含水率高于初始土壤含水率, 表明湿润峰可能超过了土体最大深度 30 cm; 而降雨高度增大到 4.0 m 时, 入渗深度仅为 17 cm。土壤表层含水率随动能的增大而减小(图 1b), 当雨滴动能 $D_E = 0$ 时, 土壤表层



含水率接近土壤孔隙度(34%), 即接近饱和状态。在下垫面、降雨强度及降雨历时一定的条件下, 产流时刻主要受雨滴动能的影响, 不同雨滴动能产流时刻存在差异(表 2)。随着雨滴动能的增加, 产流时刻逐渐减小。雨滴动能为零时, 红壤坡面基本无产流; 雨滴能量流为 $1.32 \times 10^{-4} W/m^2$ 时初始产流所花费的时间是雨滴能量流达到 $5.00 \times 10^{-4} W/m^2$ 时的 3 倍以上。这进一步验证了雨滴能量对径流过程的显著影响, 其原因在于雨滴动能变化导致其对表土的打击、夯实和粉碎土粒作用的变化。径流量是降雨量与土壤入渗量的差值, 当雨强一定时, 径流量大小取决于入渗量多少。如前所述, 动能增大时, 雨滴对土表的打击作用增强, 减小了表层土壤的入渗量, 使径流量增大(表 2)。雨滴击溅作用也加剧了土壤颗粒剥离地表, 形成泥沙, 并随径流迁移出坡面。降雨高度为 4.0 m, 即雨滴能量流 DE 为 $5.00 \times 10^{-4} W/m^2$ 时, 径流总产沙量达到 72 mg, 分别是降雨高度为 1.0、2.5 m 时的 3 倍和 1.2 倍; $D_E < 1.32 \times 10^{-4} W/m^2$ 时, 几乎无泥沙流失。产沙量(S_y)与雨滴能量流(D_E)可用对数函数描述: $S_y = 51.95 \ln D_E - 10.59$ ($R^2 = 0.85$) (图 2)。由图 2 可见, 红壤坡面雨滴动能对侵蚀的影响存在一个下限值, 这与 Wang 等^[9]基于黄壤土的研究基本一致。该结果间接说明地表植被覆盖可以有效削弱雨滴动能, 减少雨滴对地表的打击夯实作用和地表土壤颗粒分散作用, 从而增大土壤水分入渗, 减少径流量和产沙量。

相同降雨强度、不同雨滴动能条件下雨滴对土壤的打击、夯实强度不同, 地表土壤结构的变化也存在差异, 使得土壤入渗特征、径流随时间变化的过程也存在差异。由图 3 可见, 降雨历时 60 min 内不同降雨动能下坡面径流强度与时间关系变化趋势基本一致, 在产流约 25 min 内径流强度均呈线性增大趋势; 在 25 ~ 60 min 内径流强度趋于平稳; 产流时间越长的坡面, 其径流强度平稳变化趋势越明显, 这说明此时土壤结构稳定性达到了平衡状态。不同雨滴动能条件下径流总量(T_R)与雨滴能量流(D_E)呈幂

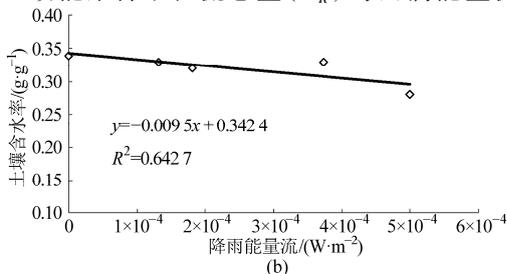


图 1 雨滴动能对土壤水分分布的影响

Fig. 1 Effect of rain droplet kinetic energy on distribution of soil water in soil profile

表2 不同雨滴动能下径流量、产沙量及溶质流失量

Tab.2 Amount of runoff, sediment yield and solution loss under different rain droplet kinetic energy

雨滴能量流/ ($W \cdot m^{-2}$)	产流历时/ min	径流总量/ mL	产沙量/ mg	径流溴流失量/ mg	径流 DP 流失量/ mg	径流 TP 流失量/ mg
0	52 ± 9^c	415 ^a	0 ^a	4.5 ^a	0.03 ^a	0.15 ^a
1.32×10^{-4}	23 ± 1.2^b	1558 ± 565^{ab}	0 ^a	20.4 ± 7.1^a	0.41 ± 0.25^a	0.25 ± 0.18^{ab}
1.81×10^{-4}	11 ± 3^a	3187 ± 734^b	25.0 ± 9.9^a	23.5 ± 9.5^a	0.79 ± 0.26^a	0.52 ± 0.19^{ab}
3.73×10^{-4}	15 ± 1.2^{ab}	6951 ± 1135^c	59.0 ± 10.2^b	125.5 ± 21.3^b	0.27 ± 0.20^a	1.11 ± 0.49^b
5.00×10^{-4}	7.00 ± 0.33^a	9120 ± 220^c	223 ± 16.0^c	114.7 ± 3.6^b	3.27 ± 0.23^c	2.91 ± 0.04^c

注:表中同一列数值上标小写字母相同者,表示差异不显著($P > 0.05$)。

函数递增关系,可表示为 $T_R = 457.97D_E^{1.87}$ ($R^2 = 0.99$)。从径流强度变化过程对比发现(图3),雨滴降雨高度为0.7 m和1.0 m坡面的径流强度变化接近;而2.5 m和4.0 m之间的径流强度变化差异也较小,但是前2组与后2组之间的差异较大,即降雨高度增大相同数量下,径流强度的数量并未成倍增大。表明土壤抗雨滴击溅和夯实作用的强度可能存在一个极限值,这有待结合土壤结构、土壤力学理论与水分入渗关系进一步深入探讨。

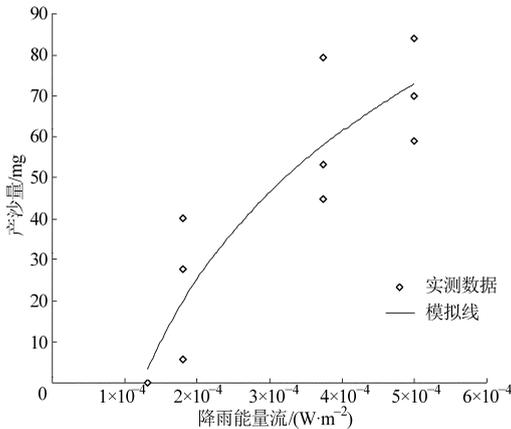


图2 降雨能量流与产沙量关系

Fig.2 Relationship between rain droplet energy flux and sediment yield

利用 SPSS 软件进行方差分析并 F 检验结果表明,在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,雨滴动能对产流时刻、径流总量、径流产沙量,径流溴流失量、径流溶解态磷 DP 流失量和径流全磷 TP 流失量等多项

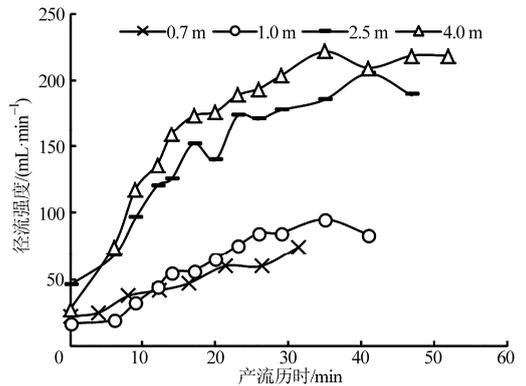


图3 雨滴动能对地表径流强度的影响

Fig.3 Effect of rain droplet kinetic energy on runoff rate

观测值的影响显著(表2)。

3.2 雨滴动能对红壤径流溶质迁移的影响

坡面土壤溶质迁移过程与径流关系密切,其迁移特征也取决于溶质的性质。图4a描述了不同雨滴降落高度下径流溴离子浓度的动态变化过程。由图4a可知不同雨滴动能作用下坡面径流溴离子浓度随时间变化规律基本一致。溴离子浓度随时间均呈幂函数衰减过程。然而,降雨高度为1.0 m和4.0 m情况下,径流后期溴离子浓度随时间的变化趋于平缓,且后期径流溴离子浓度很低,几乎为零;降雨高度为0.7 m和2.5 m的坡面径流溴离子浓度在径流平稳期较高,达到了15 mg/L(图4a)。由此可见,不同雨滴降雨高度即雨滴打击动能不同,径流溴离子浓度的衰减速度存在差异。不同产流时段土壤溴离子向径流迁移数量的多少,既取决于表层土

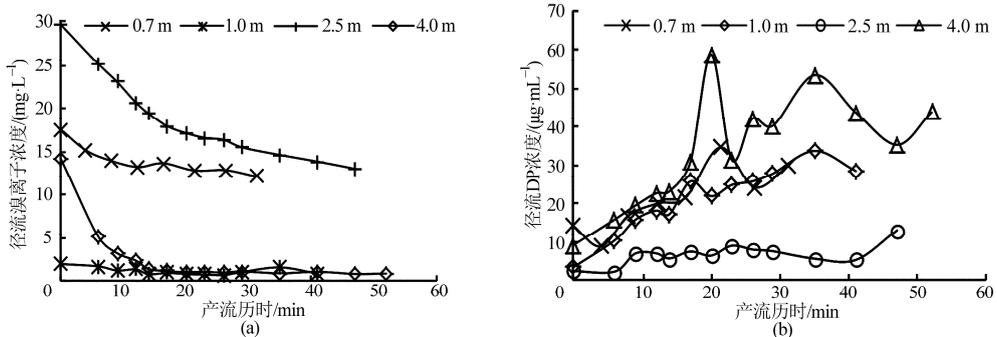


图4 不同雨滴降落高度下径流溶质浓度变化过程

Fig.4 Variation of solution concentration in runoff under different rain droplet falling heights

壤中溴离子数量的多少,即“源”,又与土壤溴离子迁移出表层土壤的途径即“路径”关系密切。溴离子属于非吸附性离子,极易随水分迁移,因此溴离子的迁移与土壤水文过程极为密切。若初始产流延迟时间较长,降雨雨水转换为入渗水并携带表层大量溴离子淋溶到深层;一旦地表产流,径流溴离子浓度较低,溴离子的“源”不足;若雨滴动能增加,雨滴对地表土壤打击强度较大,土表在受到雨滴的打击作用下会形成封闭的致密层,减小土表入渗量,很快产流,因此初期径流溴离子浓度较高,但浓度值迅速衰减。这是由于表层土壤溴在雨滴强烈打击作用下快速释放并溶入径流中;另一方面,打击作用形成的致密层迅速阻断了深层土壤中溴离子浸入表层并跃迁到径流中,从而表层土壤溴“源”迅速衰减,导致产流后期径流溴离子浓度很低。可见,径流溴离子浓度变化的快慢可间接反映坡面土壤物理、水文状况的瞬态变化。

图 4b 为各降雨高度下径流 DP 的变化过程。从图 4b 可以看出,总体上各动能下径流 DP 浓度随降雨历时呈增长趋势。除降雨高度为 2.5 m 的径流 DP 浓度最低外,其他雨滴动能条件下都有明显的浓度峰值,且动能越大,同一降雨时段 DP 浓度越高。由于土壤对磷元素具有较强的吸附固定作用,尤其是南方粘粒含量大的粘性红壤。然而,雨滴击溅-径流冲刷-土壤崩解或剥离等之间不可忽视的相互作用,对土壤磷起到较强的解吸作用;在动能较大的条件下,雨水-径流-土壤系统在雨滴击溅打击下发生强烈的浸提作用,土壤表层磷元素被溶解,并迁移到径流中。因此动能、产沙量较大时坡面径流水溶性磷 DP 浓度较高。从各降雨动能条件下径流全磷 TP 流失总量来看(表 2),径流全磷流失总量(T_p)与雨滴动能(D_E)的关系可用指数函数 $T_p = 0.0616e^{0.7437D_E}$ ($R^2 = 0.98$) 描述,且径流全磷流失量与径流总量及径流产沙量高度相关。这说明磷元素

的流失除受侵蚀的影响外,还与径流量有一定的内在关联。由于施加在土壤中的磷涉及到吸附与解吸附过程,而这 2 个过程的强烈程度与土壤性质、土壤温度、土壤含水率、雨滴作用时间及强度等众多因素有关。因此,降雨高度为 2.5 m 的径流 DP 浓度为何最低,这涉及到诸多因素的相互作用结果。总之,坡面径流溶质浓度随产流过程的变化特性与坡面土壤水文状况有关,也与溶质化学特性关系密切;降雨雨滴动能对表层土壤物理特征的影响相对微观,因而它对溶质流失过程的影响效应有可能被试验过程中其他因素控制不严所导致的误差而削弱。因此,在揭示雨滴能量与溶质迁移关系的研究时,需要严格控制试验条件、探寻更好的试验方法与手段。

3.3 雨滴动能对红壤剖面溶质分布的影响

施加于地表土层中的溶质迁移途径除了随地表径流流失外,另一重要途径是土体深层渗漏。土壤溶质伴随着土壤水分运动而运移,因此有类似于土壤水分运移的特性,同时又具有其独特的运移规律。土壤溶质含量剖面分布特征也间接反映了地表径流溶质流失规律。图 5a 显示了不同雨滴高度下土壤溴质量比的剖面分布。从图 5a 可以看出,随着动能的减小,溴离子浓度峰值逐渐减小,且逐渐向深层迁移,溶质分布范围扩宽;随着动能的减小,表层 5 cm 内的土壤溴离子质量比愈来愈少,这也使得土壤溶质参与径流的概率减小,进一步说明了径流溴离子浓度愈低的原因。降雨高度为 4.0 m 时,雨滴动能最大,形成表层致密层,降低土壤入渗能力,从而溴离子淋溶深度最浅,致密层也阻止了表层以下土壤溴离子迁移到地表径流的几率,进一步说明径流后期溴离子浓度很低的原因。

图 5b 描述了各雨滴降落高度下土壤速效磷质量比的剖面分布。由图 5b 可知,从表层到土壤 5 cm 深处,速效磷浓度急剧衰减,5 cm 以下速效磷浓度极低,且无明显变化。这表明磷元素在土壤中的吸

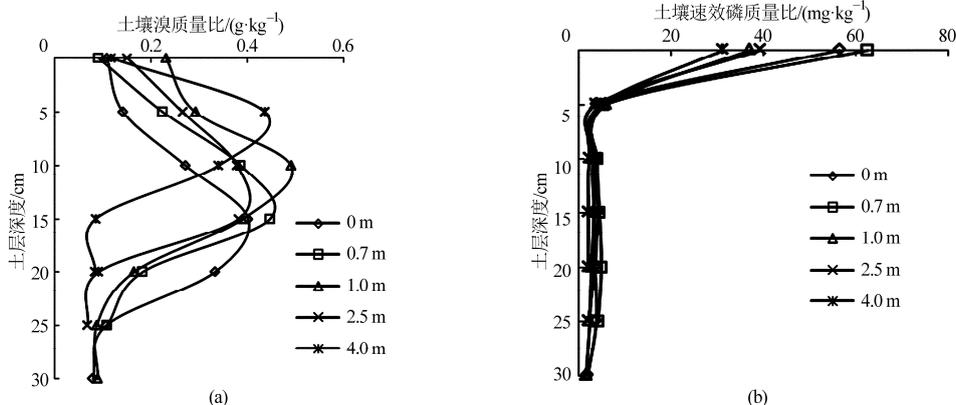


图 5 不同雨滴降落高度下土壤剖面溶质含量分布

Fig. 5 Distribution of solution concentration in soil profile under different rain droplet falling heights

附能力较强,主要富集在表层土壤中。在降雨高度为4.0 m时表层土壤速效磷质量比最低,结合各动能下产沙量(表2)可以发现,降雨高度4.0 m时产沙量最多,因而吸附能力强的磷元素随产沙量的增大而增大,滞留在土壤中的速效磷相应会减少。然而,表层土壤速效磷质量比最高值不是降雨高度为0 m的土表,而是降雨高度为0.7 m的土表(图5b),这可能是由于雨滴动能为0时,坡面径流少,没有泥沙流失,也不存在随泥沙流失的速效磷;但此条件下,雨水与地表土壤接触时间长,进入土壤中的雨水增多(无径流产生),水分下渗增加,因此表层土壤磷被雨水溶解的数量增多,向表土以下淋溶数量可能也加剧,导致土壤表层磷素含量反而降低。

4 结论

(1)红壤坡面土壤表层含水率、土壤水分入渗深度及初始产流时刻均随降雨雨滴动能增大而线性

减小;雨滴动能大对红壤坡面产流变化过程的影响无显著差异,而径流总量随着雨滴动能增大呈线性增长趋势。径流产沙量随着雨滴动能增大而增大,但雨滴动能对侵蚀的影响存在下限值,即雨滴能量小到一定值时,坡面无侵蚀发生。

(2)雨滴动能对红壤坡面径流溴离子浓度变化规律无显著影响,径流溴离子浓度随时间均呈幂函数衰减。随着动能的增大,径流溴离子流失总量逐渐增大。径流DP浓度随降雨历时呈增大趋势,除降雨高度为2.5 m外,其他雨滴动能条件下都有明显的浓度峰值,动能越大,同一产流时段DP浓度越高。径流TP流失总量随雨滴动能的增大而增多,与径流总量及径流产沙量均显著相关。

(3)土壤中溴离子淋溶深度随雨滴动能的增大而减小;磷素富集在表层土壤中,因而雨滴动能越大,产沙量越多,径流磷浓度越高,表层土壤磷素含量越少。

参 考 文 献

- 1 王全九,张江辉,丁新莉,等. 黄土区土壤溶质径流迁移过程影响因素浅析[J]. 西北水资源与水工程,1999,10(1):9-13. Wang Quanjiu, Zhang Jianghui, Ding Xinli, et al. Analysis of influencing factors of soil solute transfer with surface runoff[J]. Water Resources & Water Engineering, 1999,10(1):9-13. (in Chinese)
- 2 王全九,沈冰,王文焰. 降雨动能对溶质径流过程影响的实验研究[J]. 西北水资源与水工程,1998,9(1):17-21. Wang Quanjiu, Shen Bing, Wang Wenyan. Experimental study of effects on rainfall energy on solute runoff process[J]. Water Resources & Water Engineering, 1998, 9(1):17-21. (in Chinese)
- 3 Ahuja L R. Release of a soluble chemical from soil to runoff[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(4):948-956,960.
- 4 Ahuja L R, Lehman O R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff [J]. Journal of Environmental Quality, 1983, 12(1):34-40.
- 5 Ahuja L R, Sharpley A N, Lehman O R. Effect of soil slope and rainfall characteristics on phosphorus in runoff[J]. Journal of Environmental Quality, 1982, 11(1):9-13.
- 6 Thompson A L, James L G. Water droplet impact and its effect on infiltration[J]. Transactions of the ASAE,1985,28(5):1506-1510,1520.
- 7 Sharpley A N. Depth of surface soil-runoff interaction as affected by rainfall, soil slope, and management[J]. Soil Science Society of America Journal,1985,49(4):1010-1015.
- 8 Thompson A L, Ghidry F, Regmi T P. Raindrop energy effects on chemical and sediment transport [J]. Transactions of the ASAE, 2001,44(4):835-841.
- 9 Wang Quanjiu, Horton R, Shao Mingan. Effective raindrop kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff [J]. Soil Science, 2002,167(6):369-376.
- 10 Steiner M, Smith A. Reflectivity, rain rate, and kinetic energy flux relationship based on raindrop spetira[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(11):1923-1939.
- 11 Uijlenhoet R, Stricker J N M. A consistent rainfall parameterization based on the exponential raindrop size distribution[J]. Journal of Hydrology, 1999, 218(3-4):101-127.
- 12 Ricardo L F, Hans R V, Jan D N. Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies[J]. Journal of Hydrology, 2005,300(1-4):20-32.
- 13 Ian Brodie, Colin Rosewell. Theoretical relationships between rainfall intensity and kinetic energy variants associated with stormwater particle washoff[J]. Journal of Hydrology, 2007,340(1-2):40-47.
- 14 Smith S J, Davis R J. Relative movement of bromide and nitrate through soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1974, 3(2):152-155.
- 15 舒若杰,高建恩,吴普特,等. 基于计算机绘图软件的雨滴谱测定新方法[J]. 中国水土保持科学,2006,4(3):65-69. Shu Ruojie, Gao Jian'en, Wu Pute, et al. Test method of rainfall spectrum using plotting software of computer[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(3):65-69. (in Chinese)
- 16 姚文艺,陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式[J]. 河海大学学报, 1993, 21(3):21-27. Yao Wenyi, Chen Guoxiang. Calculation formula of rain drop fall velocity[J]. Journal of Hohai University, 1993, 21(3):21-27. (in Chinese)

Spatial Variability Response of Soil Organic Carbon to Sampling Density Change

Ye Huichun¹ Huang Shanyu² Zhang Shiwen³ Zhang Liping¹ Huang Yuanfang¹ Huang Yajie¹

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Institute of Geography, University of Cologne, Köln 50923, Germany

3. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) in Beijing was taken as target variable and four different sampling densities were designed to investigate the structural changes of the variogram and uncertainty of spatial prediction with the study scale changes. The results showed that the mass ratio of SOC was macroscopically related to terrain factor and low sampling density data were the most optimal for use in fitting the trend values. As sampling density increasing, the variogram distribution of SOC mass ratio and its residuals flattened out gradually. The random variation was growing strongly, and the structural variation and uncertainty of spatial prediction decreased gradually. In addition, the range of variogram might also affect the uncertainty of spatial prediction. Increasing sampling density and regression Kriging method aided by terrain factors can improve the prediction accuracy of mass ratio of SOC. Therefore, soil monitoring and management introducing auxiliary variable can cut the number of sampling points to some extent without reducing prediction accuracy.

Key words: Soil organic carbon Spatial variability Scale effect Sampling density Beijing

(上接第 170 页)

Effects of Raindrop Energy on Runoff, Chemicals and Sediment Transport in Red Soil Slope

Wang Hui Ping Li'na Shen Ziyang Gong Enlei

(College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Kinetic energy from rainfall is one of the most active factors impacting soil chemicals transport in runoff and the chemicals transport by rainfall splash is usually the first step. Effects of raindrop kinetic energy on the transport of soluble chemicals and sediment to runoff and infiltration into a clay red soil were quantified. The runoff, chemical and sediment transfer were investigated in small soil beds for five kinetic energy of raindrops obtained by varying heights of fall (0, 0.7, 1.0, 2.5 and 4.0 m), using a drip-type simulator. Runoff lag time, water content in surface and depth of water infiltration decreased linearly with increasing of the droplet energy flux (DE). The relationships of total runoff (TR), sediment yield (SY) and DE were described by power and logarithmic functions, respectively. The bromide transport in surface runoff was best described by a power decay model with the decay coefficients related to rainfall energy. The concentration of dissolved phosphorus in runoff increased linearly with time and the relation between the amount of total phosphorus (TP) loss to runoff and DE was an exponential function. The vertical transport of bromide and phosphorus within the soil matrix was strongly dependent upon the raindrop impact.

Key words: Red soil slope Rainfall energy Soil erosion Solute transport Surface runoff