

间歇降雨条件下黄土坡面土壤溶质的迁移特征

张亚丽^{1,2,3}, 李怀恩², 张兴昌³, 韩燕来¹, 孟庆香^{1,3}

¹河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; ²西安理工大学/西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

³中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】研究间歇降雨条件下黄土坡地水分溶质迁移特征, 为减少汛期坡耕地肥料流失率和水土流失量提供理论依据。【方法】以黄土坡地为研究对象, 采取表层喷施和拌施两种施肥方式, 通过两场间隔 24 h 的室内模拟降雨试验, 从降雨-径流-土壤相互作用角度, 研究间歇降雨条件下坡面水土流失和土壤溶质 (NO_3^- 、 Br^- 和 PO_4^{3-}) 的迁移特征。【结果】第二次降雨的稳定产流强度、径流量和侵蚀泥沙量均大于第一次降雨, 初始产流时间和产流强度达到稳定的时间也比第一次降雨提前。与第一次降雨平稳阶段 NO_3^- 和 Br^- 的浓度相比, 第二次降雨开始产流时浓度明显偏大, 但其平稳阶段浓度又均小于前者, 而吸附性 PO_4^{3-} 的第二次降雨浓度高于第一次降雨稳定期浓度。非吸附性 NO_3^- 和 Br^- 易随入渗水迁移, 导致表层土壤溶质含量显著减少, 第二次降雨地表总流失量小于第一次降雨, 而 PO_4^{3-} 受土壤侵蚀因素影响很大, 喷施和拌施条件下 PO_4^{3-} 第二次降雨的总流失量分别为第一次降雨的 2.93 和 1.77 倍。【结论】对于土体疏松易侵蚀的黄土地区, 受降雨间歇期表层土壤溶质含量和土壤抗蚀性变化的影响, 第二次降雨的径流溶质浓度过程线不能视作第一次降雨的简单延续, 多次降雨会加剧吸附性土壤溶质的地表流失风险。在雨季里, 首次降雨时应采取必备的截流措施, 减少非吸附性土壤养分的大量流失; 对后期降雨的关注重点则是涵养水土, 防范吸附性土壤养分的流失风险。

关键词: 间歇降雨; 地表径流; 入渗; 土壤侵蚀; 土壤溶质迁移

Release and Transport Characters of Soil Solutes on Loess Slope in Interval Rain Events

ZHANG Ya-li^{1,2,3}, LI Huai-en², ZHANG Xing-chang³, HAN Yan-lai¹, MENG Qing-xiang^{1,3}

¹Institute of Resources and Environment, Henan University of Agriculture, Zhengzhou 450002; ²Xi'an University of Technology/
Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Laboratory of Ministry of Education, Xi'an 710048;

³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/State Key Laboratory of Soil Erosion and
Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】 Transport characters of soil water and solute on slope land in interval rain events are important to reduce soil and water loss and to protect water and soil resources in erosion region. 【Method】 According to the results of indoor simulation experiments of rainfall on loess slope land with spray-applied fertilizer or mixed-applied fertilizer, and the interaction of rainfall, surface runoff and soil, the soil erosion, transport characters of soil NO_3^- , Br^- , and PO_4^{3-} in two rain events with the interval of 24 hours were investigated. 【Result】 Results showed that the stable rainfall intensity, amount of runoff and sediment in the 2nd rain was usually more than that of the 1st one, and more quick for the surface runoff initiation and the stable period occurrence. Compared with the NO_3^- and Br^- concentration in surface runoff of the stable content period in the 1st rain, the concentration of the surface runoff initiation in the 2nd rain was heigher than the former, while that of the stable content period in the 2nd rain was lower. The soil PO_4^{3-} concentration in surface runoff in the 2nd rain, however, was usually heigher than that of the stable content period in the 1st rain. There was less surface loss amount of soil NO_3^- and Br^- in the 2nd rain, with the result of its available infiltration and the content decreased in the upper layer. While the PO_4^{3-} surface loss in the 2nd rain was 2.93 times and 1.77 times greater than that in

收稿日期: 2008-06-26; 接受日期: 2008-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (40801102, 90610030)、国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07010-004)

作者简介: 张亚丽 (1976—), 女, 河南南阳人, 讲师, 博士, 研究方向为土壤溶质迁移和农业非点源污染机理。Tel: 13223026462; Fax: 0371-63555504; E-mail: skyali@163.com.

the 1st rain, for surface spraying treatment and mixed-applied one, respectively. **【Conclusion】** Therefore, for the vulnerable erosion loess slope, the solute content curve of surface runoff in the 2nd rain is not the extension of that of the former, as the result of the changing solute content and the antierosive ability of the upper soil. Affected by the erosive hazards, there will be more soil solute loss caused by continuous rainfall events. Some flow control measures are suggested for the initial rain event in rainy season to lessen the loss of soil non-adsorbed nutrient. The key to the latter rain is protection of soil and water and prevention of the loss of soil adsorbed nutrient.

Key words: interval rain events; surface runoff; infiltration; soil erosion; soil solute release and transport

0 引言

【研究意义】水土流失是当今世界最为严重的生态环境问题之一, 不仅严重制约着农业生产, 而且日益威胁着人类赖以生存的自然环境^[1-3]。中国黄土高原地区以旱作坡地农业为主, 降雨多以暴雨形式出现, 6—9月汛期降水量占全年降水量的60%以上, 侵蚀产沙和土壤养分流失也多集中在暴雨季节^[1,3]。对于坡地而言, 降雨既是维持植物(农作物、林和草)生长的水分来源, 又是土壤侵蚀、养分流失和农田污染物输出的原动力。**【前人研究进展】**许多学者以黄土坡地或小流域为研究对象, 分析了降雨条件对坡面水土流失和土壤养分迁移的影响^[4-10]。广义上讲, 降雨特征包括雨强、降雨量、雨滴动能、雨型、降雨历时、降雨场次以及暴雨中心等^[11]。然而考虑到试验观测、定量方便以及影响程度的不同, 在实际研究中往往以雨强、雨量和雨型为主要研究对象, 其中连续降雨条件下土壤溶质流失规律的研究较多, 缺乏间歇降雨条件下土壤溶质迁移规律的研究。关于间歇降雨, 修订通用土壤流失方程RUSLE中给出了划分标准: 降雨间歇时间在6h以上或连续6h降雨量不足1.2mm, 则视为二次降雨事件, 否则看作一次降雨事件(次降雨)^[11]。**【本研究切入点】**前期降雨改变了坡地表层土壤的抗冲、抗蚀性能和溶质含量, 降雨间歇期内土壤水分及溶质将重新分布, 导致二次降雨时土壤溶质的迁移特征变得更加复杂。因此, 基于土壤溶质迁移动力学和坡地水文学, 分析间歇降雨条件下产流-入渗-土壤侵蚀和溶质迁移过程, 对揭示降雨-径流-土壤相互作用过程和农田化学物质迁移机理具有重要意义。**【拟解决的关键问题】**本文以黄土坡地为研究对象, 采取表层喷施和拌施两种施肥方式, 通过两场间隔24h的模拟降雨试验, 研究黄土坡面土壤溶质 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和Br⁻的迁移规律, 以期为提高雨季土壤肥料利用率和减少污染物输出量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

模拟降雨试验所用土壤采自陕西省安塞县的耕层土, 为黄绵土, 质地为砂质壤土。有机质含量为 $3.94 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、硝态氮为 $5.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $3.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Br⁻为 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $<0.002 \text{ mm}$ 、 $0.002\sim 0.05 \text{ mm}$ 、 $>0.05 \text{ mm}$ 颗粒含量百分数分别为2.3%、63.1%、34.6%, pH为8.35。安塞县地处陕北黄土高原丘陵沟壑区, 境内水土流失面积占土地总面积的比重约97%, 土壤侵蚀模数一般在 $4\ 000\sim 15\ 000 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 多年平均输沙量 $2\ 388\times 10^4 \text{ t}$, 年平均输沙模数达 $8\ 373 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$, 属于强度水土流失区^[4]。模拟降雨试验在中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行。采用侧喷式自动模拟降雨系统, 喷头高度16m, 雨滴组成与天然降雨接近, 最大雨滴直径可达5mm, 雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的98%以上^[12]。装土槽为6个长 \times 宽 \times 高=1.0m \times 0.3m \times 0.55m的坡度可调式钢槽, 下端设集流装置, 可定时采集径流样。槽底均匀打孔, 用于模拟天然透水坡面, 在土槽的径流出口处安装“V”形钢槽收集径流。土槽内土壤装至35cm高, 与出水口齐平, 其上20cm高的钢板可以防止因雨滴打击作用使槽内物质溅出槽外。槽底均匀打孔, 用于模拟天然透水坡面。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤制备和填装 先将供试土壤过5.0mm孔筛网、风干并混合备用。将一定量水喷洒在摊开的风干土上, 充分混匀后用塑料布覆盖, 静置24h并控制土壤含水量 $(10\pm 0.5)\%$ 。装土时土壤容重维持在 $(1.30\pm 0.05) \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 每5cm填装一层。在填装土壤时, 应避免土壤分层。装土完毕后, 按照Br 450 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、P110 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和N150 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的量施肥, 分别采用表层1cm拌施和喷施的方式施肥, 喷施和拌施各设置2个重复。先将一定量肥料 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 和KBr溶于水配制标准溶液, 拌施是在避风处用喷雾器均匀喷洒在一定量备用风干土上, 充分搅拌后用塑料布覆盖并静置24h, 平铺在坡面表层0~1cm并砸实。喷施是将等量的标准混合溶液均匀喷施在供试坡地表面, 喷射成雾状, 避免对坡地表层土壤冲击形成

结皮并防止喷施到试验区外。降雨前各坡地都用塑料薄膜密封覆盖并统一静置 24 h，以便获得肥料和土壤含水量均匀的土壤，亦可消除施肥时间对土壤溶质迁移的影响。

1.2.2 模拟降雨过程 降雨强度（雨强）定为 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ，坡度为 15° 。降雨前多次率定雨强，当降雨大小和均匀度均达到要求时开始降雨试验。本试验总降雨时间为 120 min，第一次降雨时间为 60 min，降雨结束静置 24 h 后，开始第二次降雨，降雨时间亦为 60 min。降雨试验所用雨水为当地地下水，雨水中 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 Br^- 的含量分别为 6.87 、 0.05 和 $0.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。第一次降雨结束后分别选择 1 个喷施和 1 个拌施的土槽，立刻从坡面中间位置垂直向下挖剖面取土，第二次降雨结束后将其余的土槽以同样的方式取土。取土方式均为表层按 $0\sim 0.5 \text{ cm}$ 、 $0.5\sim 1 \text{ cm}$ 取 2 个土样，以下每 1 cm 取 1 个土样直至槽底，以测定土壤剖面溶质和水分含量。地表产流后记录初始产流时间，产流 10 min 内每间隔 1 min 用塑料小桶承接 1 min 径流样，其后产流 10~30 min 内每间隔 5 min 取一次径流样（1 min），产流 30 min 后间隔 10 min 取一次径流样（1 min），其余径流全部收集在塑料大桶中。测量塑料小桶中径流样，确定不同时刻的径流量；从每个塑料小桶中取出部分澄清的水样，装入 50 ml 塑料瓶中；从径流大桶取 2 个水样测定地表径流溶质的平均浓度；最后将剩余泥水样澄清并倾水后，将泥沙风干称重备用。忽略雨期蒸发，各时段的径流强度由下式^[8]计算：

$$V_R = 10R_u / (St) \quad (1)$$

式中， V_R 为径流强度 ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)； R_u 为径流量 (ml)； S 为坡面受雨面积 (cm^2)； t 为降雨历时 (min)。

1.2.3 样品测试 水样过滤后冷藏在冰柜中供化学分析用。土壤水分含量测定用烘干法，土壤颗粒组成用比重计法测定，土壤有机质用重铬酸钾-外加容量法测定，土壤 pH 用赛多利斯 pH 计测定（土水比为 1 : 2.5）。土壤和泥沙中 NO_3^- 用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提（土水比为 1 : 5），土样和水样 NO_3^- 采用酚二磺酸比色法测定；土壤和泥沙中的有效磷用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 -钼锑抗比色法测定，径流中 PO_4^{3-} 采用钼蓝比色法测定；土样 Br^- 用蒸馏水浸提（土水比 1 : 5），振荡 30 min 后过滤，土样和径流中 Br^- 采用精密离子计 SX3805 测定。

2 结果与分析

2.1 坡面水土流失过程分析

降雨不仅是坡地水土流失和养分流失的主要动力，对土壤特性和近地表水文条件也有重要影响。图 1 为降雨过程坡面产流强度变化图。为了便于对比分析，将两次降雨的径流强度绘在同一张图上。第二次地表产流很快，喷施和拌施 2 个处理第二次降雨的初始产流时间分别比第一次降雨提前了 4.8 和 5.5 min；第二次降雨达到较稳定产流强度的时间比第一次降雨约缩短了 10 min，且第二次降雨的稳定产流强度均大于第一次降雨。这说明第一次降雨不仅使坡面土壤含水量显著增加，产汇流速度加快。同时由于雨滴对表层土壤的打击夯实作用，24 h 后坡面形成了一层较为密实的致密层，使坡面入渗率降低，产流量增加。第一次降雨坡地以雨滴溅蚀和片蚀为主。第二次降雨时，在降雨中后期还有轻微细沟侵蚀出现，导致泥沙量明显高于第一次降雨。喷施和拌施处理的第二次降雨径流量分别是第一次降雨的 1.5 倍和 1.75 倍，第二次降雨的侵蚀泥沙量分别为第一次降雨的 3.22 倍和 1.43 倍（表）。

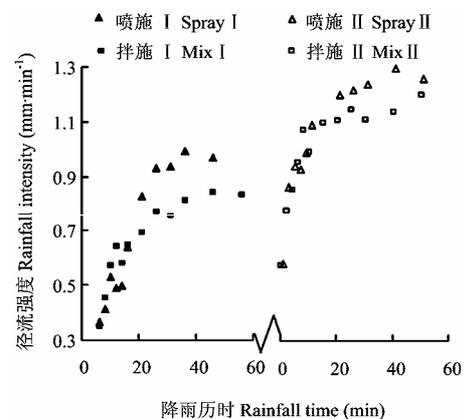


图 1 降雨过程坡面产流强度

Fig. 1 Variation of runoff intensity during the rainfall

2.2 降雨过程地表径流溶质浓度分析

图 2 描述了两场降雨事件中地表径流的溶质浓度变化过程。对于非吸附性的 NO_3^- 和 Br^- ，两场降雨过程中溶质浓度均呈现由高降低并逐渐平稳的变化趋势。与第一次降雨平稳阶段的浓度相比，第二次降雨开始产流时刻溶质浓度明显偏大，但其平稳阶段浓度又均小于前者。土壤对 PO_4^{3-} 有较强的吸附性，因此其

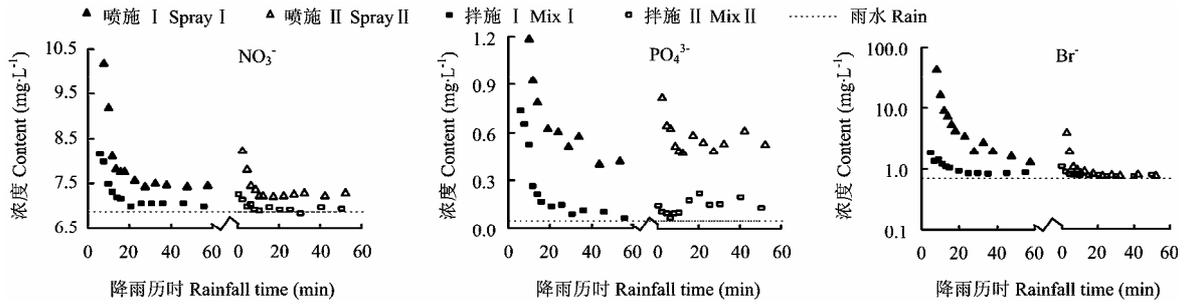


图 2 第一次降雨和第二次降雨径流中溶质浓度变化

Fig. 2 Solute concentration in surface runoff in two rainfall events

表 坡面水土流失量和溶质地表流失情况统计

Table Soil, water and solute surface loss amount in two rain events

处理 Treatment	降雨 场次 Rain event	径流深 Runoff depth (mm)	泥沙量 Sediment (t·km ⁻²)	NO ₃ ⁻			PO ₄ ³⁻			Br ⁻		
				径流中 流失量 ¹⁾ Runoff loss (mg·m ⁻²)	泥沙中 流失量 (mg·m ⁻²)	流失 率 ²⁾ Loss percent (%)	径流中 流失量 (mg·m ⁻²)	泥沙中 流失量 (mg·m ⁻²)	流失率 Loss percent (%)	径流中 流失量 (mg·m ⁻²)	泥沙中 流失量 (mg·m ⁻²)	流失率 Loss percent (%)
喷施 Spray-applied fertilizer	I	43.91	101.02	53.82	1.30	4.50	14.52	3.59	2.23	122.46	1.45	0.56
	II	65.78	325.76	13.59	3.10	1.36	37.30	15.83	6.54	11.78	3.43	0.07
	总计 Total	109.68	426.78	67.41	4.40	5.86	51.82	19.42	8.77	124.24	4.88	0.58
拌施 Mixed-applied fertilizer	I	36.05	111.25	11.66	0.32	0.98	3.18	1.39	0.56	4.88	0.00	0.02
	II	62.94	158.92	1.14	0.24	0.11	6.72	1.37	1.00	0.57	0.00	0.00
	总计 Total	98.99	270.17	12.80	0.56	1.09	9.90	2.76	1.56	5.45	0.00	0.02

¹⁾ 流失量均为扣除雨水（原始土）溶质背景值的净流失量；²⁾流失率=（径流流失量+泥沙流失量）/施肥量×100%

¹⁾ Loss amount means the net loss amount with the base amount neglected; ²⁾ Loss percent=(runoff loss+ sediment loss)/fertilizer amount ×100%

地表流失除了与表层土壤 PO₄³⁻的固液相组成比例和降雨径流的冲刷解吸能力等有关外，主要还受坡面侵蚀状况影响。降雨初期表层水溶性 PO₄³⁻的含量较高且径流中被雨滴溅蚀分离的土壤颗粒也含有大量养分，因此初始产流时浓度最高，之后逐渐递减并开始趋于稳定。第二次降雨地表产流时，径流 PO₄³⁻的浓度也高于第一次降雨稳定期浓度。

地表径流中溶质浓度同时取决于表层土壤溶质的含量和地表径流对溶质的解吸溶解能力。初始产流时，土壤黏粒含量较高，吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中的溶质含量相对较高，坡面径流的稀释溶解作用较强，浓度相应较高。随降雨的持续，表层土壤溶质不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁移，径流溶质含量逐渐降低并趋于稳定。第二次降雨地表

产流后，坡面径流量和径流强度明显高于前期降雨初期，对溶质的解吸溶解能力也相应增加。因此，间歇期内表层土壤溶质含量的变化是第二次降雨产流初期地表径流溶质浓度较高的主要原因。

2.3 坡面溶质地表流失量分析

由表知，两场降雨喷施处理的溶质流失量均大于表层拌施，第一次降雨喷施坡地 NO₃⁻、PO₄³⁻和 Br⁻的地表总流失量（径流和泥沙中流失量之和）分别为拌施坡地的 4.60、3.96 和 25.39 倍，第二次降雨中对应各比值分别为 12.09、6.56 和 26.68。避免在暴雨前大量表施肥料，是降低土壤溶质流失的有效途径。

第一次降雨改变了坡地的近地表土壤水分条件，也不同程度的影响了溶质在土壤剖面的分布情况。NO₃和 Br⁻的迁移性很强，第一次降雨结束后，除部分

溶质随地表径流迁移出坡地外，大部分已经入渗到较深土层，表层 0~1 cm 滞留溶质的浓度略高于原始未施肥土（图 3）。第二次降雨时，由于可供地表径流和侵蚀泥沙挟带的溶质质量远低于前期降雨处理，导致溶质的地表流失量显著降低。由表可知，喷施处理中 NO_3^- 和 Br^- 的第一次降雨总流失量为第二次降雨的 3.30 倍和 8.15 倍，拌施处理第一次降雨总流失量分别为第二次降雨的 8.68 倍和 8.56 倍。与 NO_3^- 和 Br^- 不同， PO_4^{3-} 易被土壤颗粒吸附，第一次降雨结束后，表层 3.5 cm 以上土层的滞留量依然很高，尤其是表层 0~1 cm 土层含量最大（图 3）。第二次降雨时，坡面侵蚀状况加剧了表层土壤 PO_4^{3-} 的流失。喷施和拌施条件下 PO_4^{3-} 第二次降雨的总流失量分别为第一次降雨的 2.93 倍和 1.77 倍。降雨条件下，地表径流和侵蚀泥沙是土壤溶质坡面流失的主要载体^[3]。由表可知，坡地各溶质随地表径流的流失量占其总流失量的比例以 Br^- 最高，为 85%~100%； NO_3^- 次之，为 78%~98%； PO_4^{3-} 最低，为 70%~80%。

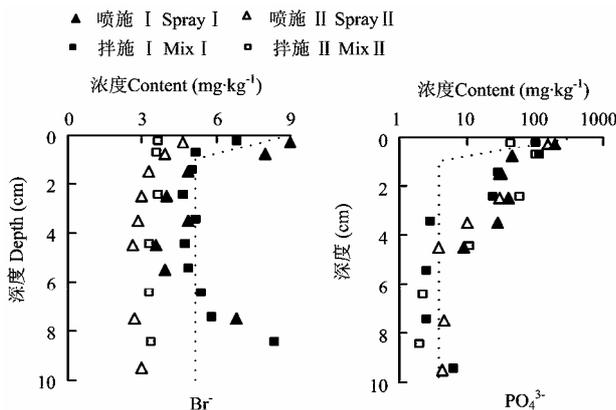


图 3 降雨结束后土壤剖面溶质分布

Fig. 3 Solute distribution in soil profile after raining

2.4 坡面溶质入渗分析

土壤是农田养分流失或污染物迁移的母体，溶质在土壤剖面的分布状况对其地表流失具有重要影响。在黄土坡地，因土层深厚且地下水位低，土壤养分的淋溶损失一般不予考虑。根据国内外研究结果，影响坡面养分径流流失的土层深度较浅^[13-16]。所以，这里仅研究表层 10 cm 内溶质的分布状况。

Br^- 和 NO_3^- 都是移动性很强的溶质，受土壤颗粒吸附作用的影响较小。研究表明 Br^- 的化学特征、阴离子

排斥以及吸附与硝态氮的表现相同^[17]。相比之下， Br^- 更稳定，且在原始土壤和雨水中的含量很低，所以这里重点研究 Br^- 和 PO_4^{3-} 的入渗规律。由图 3 知，第一次降雨结束时，表层施肥区 Br^- 的含量约为降雨前的 5%~10%，除表层 0~1 cm 土壤外，1~6 cm 土层的含量已接近或小于土壤 Br^- 的本底值，6 cm 以下浓度曲线又开始递增并在其下某一深度达到峰值。第二次降雨结束后，0~10 cm 土层内 Br^- 的浓度均低于土壤本底浓度。两场降雨结束后， PO_4^{3-} 在土壤中的分布变化不大，向下迁移深度约达到 4.5 cm，而且迁移量很小，基本仍在表层大量富集。

3 讨论

汛期是黄土坡地土壤侵蚀与土壤养分流失的关键阶段，分析间歇降雨对近地表土壤水分条件的影响，是揭示雨季里坡耕地土壤溶质动态迁移机理的关键。在第一次降雨结束后，表层土壤已接近饱和。第二次降雨时，土壤的抗冲抗蚀性能已大大减弱，加之水流的深度和剪切力都相应增大，从而增加了水流挟沙力，导致坡面除了溅蚀和片蚀外，在降雨中后期还有轻微细沟侵蚀出现，因此径流量和泥沙量明显高于第一次降雨。

当不考虑土壤溶质的化学变化时，降雨过程土壤溶质的迁移过程归纳为 2 个时间尺度过程^[18]：一是快速过程，降雨-径流-土壤混合层^[13-15]内溶质在雨滴打击和径流冲刷作用下进入地表径流，使表层非吸附溶质浓度明显降低；二是慢速率过程，混合层以下的溶质以分子扩散和机械弥散为主的形式迁移到混合层中。显然，对于小尺寸坡地和短历时降雨而言，快速过程对降雨过程中溶质地表迁移起主导作用。第一次降雨结束后，在降雨间歇期土壤水分及溶质将重新分布，土壤水分向着势梯度最小的方向运移，而溶质向着浓度梯度最小的状态发展，即以对流-弥散为主要形式的慢速率过程开始发挥重要作用，结果会使土壤下层的部分溶质进入混合层，使表层土壤溶质浓度有所增加。因此，第二次降雨的初始径流溶质浓度高于第一次降雨平稳期浓度。由于此时表层土壤的溶质浓度远低于第一次降雨前浓度，且第二次降雨的径流量大，对溶质的稀释作用较大，导致其平稳期浓度小于第一次降雨时的浓度，尤其是拌施处理的 NO_3^- 和 Br^- 在第二次降雨期的稳定浓度已接近雨水本底浓度。国外一些学者^[16,18]以饱和土壤非吸附性溶质为研究对象，提出第二次降雨期间径流溶质浓度过程是第一次

降雨径流浓度过程线的延续。对于土壤质地轻、渗透性强且易侵蚀的黄土地区,这似乎不够合理,尤其是吸附性土壤溶质地表流失过程受土壤侵蚀影响较大。

第一次降雨结束后, PO_4^{3-} 仍然大量富集在表层施肥区, 向下层土壤的迁移量很少, 上述慢速率过程无法解释这种现象。较为合理的解释是土壤中 PO_4^{3-} 的解吸与吸附是一个动态平衡过程, 受土壤水肥条件、pH 和温度等多种因素影响。两场降雨试验坡面水分分布不同, 第一次降雨使土壤剖面含水量增加, 改变了土壤溶液的浓度, 同时使表层土壤溶解态 PO_4^{3-} 的含量降低。降雨间歇期内, 部分吸附态 PO_4^{3-} 可能从土壤颗粒上解吸, 表层土壤溶解态 PO_4^{3-} 含量增加, 致使第二次降雨的初始产流浓度均高于第一次降雨平稳期浓度。在第二次降雨中后期, 坡地出现了轻微的细沟侵蚀, 导致径流中 PO_4^{3-} 的含量出现波动性变化。

一般说来, Br^- 和 NO_3^- 主要随水分迁移, 地表径流是其地表迁移的主要载体。多数研究表明, PO_4^{3-} 是吸附态溶质, 侵蚀泥沙是其流失的主要载体^[6,8,19-20], 与本文研究结果不同。这主要归结为以下两方面原因。其一, 本试验为小坡地模拟降雨试验, 虽然设置雨强较大, 但坡面侵蚀状况较轻, 坡面径流的平均含沙量为 $2.30 \sim 4.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据姚文艺等^[21]研究, 发生较强烈冲刷时, 含沙量一般大于 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。泥沙被地表径流沿坡地输移过程中, 部分吸附态 PO_4^{3-} 会被径流浸提溶解。其二, 为了研究施入肥料的净流失率, 扣除了原始土壤的营养背景含量, 而从环境保护角度出发, 则更关注进入水体的污染物总量。由于坡地投影面积不足 1 m^2 , 不同的计算方法也会对结果造成一定的影响。

综上所述, 雨季里表层施入的非吸附性溶质随着土壤水分的入渗, 将被逐步淋洗到较深土层并在一定范围内大量富集, 随地表径流流失的风险也随之降低。因此, 在雨季来临前应该避免在久旱的坡耕地表层大量施肥, 同时对首次降雨应该采取必要的截流措施, 避免非吸附性土壤养分的大量流失。此外, 雨季里土壤含水量普遍很高, 土壤团聚体的稳定性较差, 土壤侵蚀和吸附性磷的流失风险很大。为了降低这种流失, 所采取的管理措施应该考虑土壤前期含水量的影响, 例如保护性耕作和作物覆盖等。

4 结 论

4.1 间歇降雨条件下, 径流溶质浓度因降雨场次和溶质吸附性不同而存在差异。前期降雨过程中, 径流溶

质浓度均呈现高一递减一平稳的变化规律; 与第一次降雨平稳阶段的浓度相比, 第二次降雨开始时径流的非吸附性 NO_3^- 和 Br^- 的浓度明显偏大, 但其平稳阶段浓度又均小于前者; 第二次降雨过程中, 吸附性 PO_4^{3-} 的稳定期浓度高于前期降雨稳定期浓度。因此, 在土体疏松易侵蚀的黄土坡地, 受溶质入渗和土壤侵蚀影响, 第二次降雨的溶质浓度过程线不能视作第一次降雨的简单延续。

4.2 不同降雨场次, 非吸附性 NO_3^- 和 Br^- 和吸附性 PO_4^{3-} 的流失程度不同。前者易随入渗水迁移而导致表层土壤溶质含量显著减少, 喷施处理中 NO_3^- 和 Br^- 的第一次降雨总流失量分别为第二次降雨的 3.30 倍和 8.15 倍, 拌施处理第一次降雨总流失量分别为第二次降雨的 8.68 倍和 8.56 倍; 受土壤侵蚀影响, 喷施和拌施条件下 PO_4^{3-} 第一次降雨的总流失量分别为第二次降雨的 0.34 倍和 0.56 倍。因此在雨季里, 首次降雨应该采取必备的截流措施, 减少非吸附性土壤养分的大量流失; 后期降雨的关注重点则是涵养水土, 防范吸附性土壤养分的流失风险。

4.3 前期降雨结束后, 表层施肥区 $0 \sim 1.0 \text{ cm}$ 土层 Br^- 的含量约为降雨前的 $5\% \sim 10\%$, 第二次降雨结束后, $0 \sim 10.0 \text{ cm}$ 土层内 Br^- 的浓度均低于土壤本底浓度; 两场降雨结束后, PO_4^{3-} 在土壤中的分布变化不大, 垂向迁移量很小。对于雨季里表层施入的非吸附性溶质, 经过多次降雨后将被逐步淋洗到较深土层并在一定范围内大量富集; 对于吸附性溶质, 雨季里土壤含水量普遍很高, 受土壤侵蚀影响, 地表流失风险很大。

References

- [1] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004: 114.
Tang K L. *Soil and Water Conservation in China*. Beijing: Science Press, 2004: 114. (in Chinese)
- [2] 刘国彬, 李 敏, 上官周平, 穆兴民, 谢永生, 李占斌, 梁银丽, 张文辉, 侯庆春. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 16-21.
Liu G B, Li M, Shanguan Z P, Mu X M, Xie Y S, Li Z B, Liang Y L, Zhang W H, Hou Q C. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for loess region in the Northwestern China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 16-21. (in Chinese)
- [3] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望. 自然杂志, 2008, 30(1): 12-17.
Zheng F L, Wang Z L, Yang Q K. The retrospection and prospect on soil erosion research in China. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(1):

- 12-17. (in Chinese)
- [4] Zhang X C, Shao M A. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the Loess Plateau in China. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1195-1203.
- [5] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Effective kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff. *Soil Science*, 2002, 167(6): 369-376.
- [6] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 庞良玉. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2241-2249.
Lin C W, Chen Y B, Huang J J, Tu S H, Pang L Y. Effect of different cultivation methods and rain intensity on soil nutrient loss from a purple soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2241-2249. (in Chinese)
- [7] Gao B, Walter M T, Steenhuis T S, William L. Parlange J. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: theory and experiments. *Journal of Hydrology*, 2004, 295: 291-304.
- [8] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 李秋芳, 张兴昌. 降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 39-46.
Li Y Y, Shao M A, Zheng J Y, Li Q F, Zhang X C. Experimental study on the impacts of rainfall intensity on phosphorus loss from loessial slope land. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4): 39-46. (in Chinese)
- [9] 王 辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 39-44.
Wang H, Wang Q J, Shao M A. Laboratory experiments of soil nutrient transfer in the loess slope with surface runoff during simulated rainfall. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 39-44. (in Chinese)
- [10] 王全九, 王 力, 李世清. 坡地土壤养分迁移与流失影响因素研究进展. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(12): 109-115.
Wang Q J, Wang L, Li S Q. Research on the effective factors of nutrient transfer and loss in the slope land. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(12):109-115. (in Chinese)
- [11] 章文波, 谢 云, 刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 43-46.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Research evolution of rainfall erosivity. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(5): 43-46. (in Chinese)
- [12] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置. *水土保持通报*, 2000, 20(4): 27-31.
Zhou P H, Zhang X D, Tang K L. Rainfall installation of simulated soil erosion experiment hall of the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 20(4): 27-31. (in Chinese)
- [13] Sharpley A N. Depth of surface soil-runoff interaction as affected by rainfall, soil slope, and management. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 1010-1015.
- [14] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 孟庆香. 降雨-径流-土壤混合层深度研究进展. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 283-290.
Zhang Y L, Li H E, Zhang X C, Meng Q X. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 283-290. (in Chinese)
- [15] Ahuja L R, Sharpley A N, Yamamoto M, Menzel R G. The depth of rainfall-runoff-soil interactions as determined by ³²P. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 967-974.
- [16] Ahuja L R. Modeling soluble chemical transfer to runoff with rainfall impact as a diffusion process. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 312-321.
- [17] Smith S J, Davis R J. Relative movement of bromide and nitrate through soils. *Journal of Environment Quality*, 1974, 3: 152-155.
- [18] Zhang X C, Norton L D, Lei T, Nearing M A. Coupling mixing zone concept with convective-diffusion equation to predict chemical transfer to surface runoff. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(4): 987-994.
- [19] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Effects of near-surface hydraulic gradients on nitrate and phosphorus losses in surface runoff. *Journal of Environment Quality*, 2004, 33: 2174-2182.
- [20] Zheng F L, He X B, Gao X T, Zhang C E, Tang K L. Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 108: 85-97.
- [21] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 157.
Yao W Y, Tang L Q. *Process and Simulation of the Water Erosion and Soil Loss*. Zhengzhou: Yellow River Press, 2001: 157. (in Chinese)