

降雨强度与坡度对径流中七种阳离子流失量的影响

李俊波¹ 华 珞^{1*} 蔡典雄² 冯 琰¹ 朱凤云¹

(1 首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室 北京 100037;

2 中国农业科学院土壤肥料研究所 北京 100081)

摘要 针对密云水库周边地区坡地地貌,采用室内模拟降雨装置和 ICP-MS 质谱分析技术,研究了密云地区农田褐土在 5 种坡度和 3 种降雨强度交叉实验表层径流中 K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 7 种阳离子在不同降雨时段下的流失规律。结果表明:在坡度和降雨时间段相同时,随着雨强的增加,大部分阳离子最大流失量逐渐增加,K、Mg、Fe、Mn 规律性较强;在相同雨强和降雨时间段下,各阳离子流失量最大值所呈现的坡度不尽一致,但在雨强 120 mm/h 时,K、Na、Ca、Mg、Fe 流失量的最大值均呈现在 25° 坡度下;在坡度、雨强一致时,不同降雨时段内 7 种阳离子的流失量均呈现出随着时间的递增而逐渐增加的趋势。不同阳离子的流失总量之间随坡度的变化存在相关性,如在 60 mm/h 和 120 mm/h 降雨强度下,K、Ca 流失量之间的相关系数分别达到 0.974 和 0.953。各阳离子流失量在连续时间段下受径流量的影响不明显,但 7 种阳离子在 1 h 的流失总量与径流量之间在相同降雨强度下随坡度变化均存在二次曲线关系,复相关系数平方>0.9。

关键词 降雨强度;坡度;径流;降雨时段;阳离子流失量

中图分类号 S157.1

坡地土地利用在我国占有相当大的比例,其中坡耕地面积占总耕地面积的 2/3,作为与外界环境的直接接触体,坡地水土流失直接影响着农业的发展与整体生态环境效益的提高。但目前大多数研究侧重于坡面径流量和径流携带泥沙养分的流失规律,有关坡面径流水中阳离子流失规律研究较少。已有研究表明,耕作措施^[1]和地表覆盖^[2, 3]可有效减少径流中养分流失,对产流有一定的抑制作用;径流水中养分以速效性养分为主,其流失量不容忽视^[4-7]。水土流失是水体非点源污染的主要形式与载体^[8],K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 等阳离子为径流中养分的主要组成部分,通过对其流失量与流失规律的研究,可为坡面径流养分流失规律和调控提供科学依据。

密云水库是北京重要的水源供应地,其水质直接受周边地区土壤侵蚀与水土流失的影响,本研究针对密云水库周边地区坡地面积较大的特点,选取密云地区的农田褐土作为研究对象,采用旋转式室内模拟降水装置与 ICP-MS 质谱分析测试技术,深

入探讨了在不同降雨强度和坡度条件下,径流中 K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 7 种阳离子在不同降雨时段的流失规律及其与雨强、坡度的相互关系,为该区域坡地土壤养分流失评价、预测以及防治提供有效依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验土壤取自密云县白河入库附近的北石城,为山地褐土,是在暖温带半湿润气候,旱中生灌丛植被下发育的典型地带性土壤,质地为轻壤,占全县总面积的 83.2%。试验采用 0~20 cm 的耕层土壤。土壤基本理化性质为:pH 6.74 (电位法),有机质 26.1 g/kg (重铬酸钾-硫酸消化法),全 N 1.78 g/kg (开氏法),速效 N 112.8 mg/kg (碱解扩散法),全 P 1.14 g/kg (酸溶-钼锑抗比色法),速效 P 6.74 mg/kg (碳酸氢钠法),全 K 19.4 g/kg (氢氟酸-高氯酸消煮法),速效 K 214.0 mg/kg (四苯硼钠比浊法)^[9]。供试土壤矿质部分全量组成采用原子吸收

①北京市自然科学基金项目(6012004)、“863”国家重大项目专题(2002AA6Z3021)、首都师范大学资源环境与地理信息系统北京市重点实验室项目和北京市教委项目(KM200510028014)资助。

* 通讯作者

分光光度计(WFX-120)进行测试,其结果为, SiO₂: 642.4 g/kg; Fe₂O₃: 39.4 g/kg; Al₂O₃: 127.8 g/kg; CaO: 11.0 g/kg; MgO: 11.7 g/kg; K₂O: 20.4 g/kg; Na₂O: 13.6 g/kg; MnO: 0.8 g/kg; TiO₂: 6.3 g/kg。

将采集的土样进行混匀,通过 10 mm 筛,装槽长 60 cm,宽 30 cm,深 20 cm,土壤体积质量(容重)控制为 1.16 g/cm³,含水量为 205 g/kg。

1.2 研究方法

实验降雨装置采用比利时 Gent 大学设计制造的旋转变水头喷嘴式模拟降雨器,实验地为中国农业科学院土壤肥料研究所模拟降雨研究实验室。根据北京地区降雨特点设 3 种降雨强度: 60、90、120 mm/h,自坡面产生径流开始计时,历时 1 h。设 5 种坡度: 10°、15°、20°、25°、30°,在土槽的径流出口处用塑料桶收集径流液。进行不同雨强与坡度下的交叉实验,重复 3 次,共 45 个处理。产流开始时,每隔 10 min 为一时段换 1 次收集桶,采集 1 h 内的 6 个时段经过滤去除泥沙后的径流液,测定其体积,并分别收取各时段内混匀后的部分径流液,以供测试。利用 Agilent ICP-MS 7500 系列对所收集径流样品中的 K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 共 7 种元素进行实验测试分析;本测试在首都师范大学化学系光谱实验室进行,重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 降雨强度对各阳离子流失量的影响

在坡度和降雨时间段相同时,所测试的径流中大部分阳离子表现出随着降雨强度的增加流失量增加,即 60 mm/h < 90 mm/h < 120 mm/h,从图 1~7 中可以看出尤其以 K、Mg、Fe、Mn 呈现较好的规律性。只有部分阳离子在不同坡度与降雨时段条件下,流失量随雨强变化规律不尽一致。在坡度 10° 情况,相同时段内 K、Ca、Fe 的流失量总体表现为 60 mm/h < 120 mm/h < 90 mm/h,Al 表现为在雨强为 60 mm/h 时流失量最大,90、120 mm/h 流失量呈持平状态。在坡度 15° 和 20° 时,Na 表现出反常状态,为 120 mm/h < 60 mm/h < 90 mm/h,而 15° 时的 Ca、Fe 在同时段流失量无明显规律性,坡度 20° 的 Ca 与 10° 时表现相同,为 60 mm/h < 120 mm/h < 90 mm/h。出现不一致的原因可能是 K 易被黏土矿物固定,Ca、Fe 在北方土壤中较易沉淀,如形成 CaCO₃ 和 Fe(OH)₃,所以在坡度较小时,随径流而流失的离子有限,雨强 90 mm/h 就能最大量

地将其带走,雨强增加到 120 mm/h 时,在急水冲击下,这些沉淀来不及从土体中释放溶解出来,致使流失量较少。而 Al 大部分在黏土矿物晶格中,北方土壤游离 Al 离子较少,60 mm/h 雨强即可将表土中游离 Al 离子随径流冲刷走,而加大雨强也只有待黏土矿物晶格中的 Al 因稀释和土粒滚动互相碰撞而释放出来后才能随水流失,同时 Al 离子在迁移过程中易被其他重金属元素固定,所以表现出 90 mm/h、120 mm/h 流失量反而减少。至于 Na 在坡度 15° 和 20° 时及少数离子在坡度较小时流失量随雨强增加的变化规律还有待进一步研究。

2.2 坡度对各阳离子流失量的影响

从图 1~7 各阳离子流失量对比分析中可以看出,在降雨强度相同、时间段一致条件下,坡度对阳离子流失量的影响无明显规律性,但对流失量的最大值有一定的影响。在雨强 60 mm/h 的同时段内,K、Fe、Mn 受坡度的影响流失量变化明显,而 Na、Ca、Mg、Al 变化不显著。K 离子在第 10、20、30、40 min 各时段流失量变化表现为 20° < 30° < 25° < 10° < 15°,第 50、60 min 时段内的表现为 20° < 25° < 30° < 15° < 10°;而 Fe 在 1 h 内的 6 个时段内的总体表现为 10° < 20° < 25° < 15° < 30°;Mn 为 10° < 25° < 15° < 20° < 30°。Na 离子在第 10、20、30、40 min 各时段,在坡度 20° 时流失量最大,在第 50、60 min 时段,在坡度 10° 时最大,其他同时段随坡度变化 Na 离子流失量差异不大。Ca 离子在第 10、20、30、40 min 各时段,在坡度 15° 时流失量最大,在第 50、60 min 时段,在坡度 10° 时最大,第 50、60 min 时段内的总体表现为 25° < 30° < 20° < 15° < 10°。Mg 在第 10、20、30、40 min 各时段,在坡度 20° 时流失量最大,在第 50、60 min 时段,在坡度 10° 时最大,各时段均在坡度 15° 时表现出流失量最小值。Al 离子在第 10、60 min 时段,在坡度 10° 时流失量最大,在第 20、30、40 min 各时段,在坡度 30° 时流失量表现出最大值,各时段均在坡度 15° 时出现流失量最小值。

在雨强 90 mm/h 的相同时间段内,Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 流失量在坡度的影响下呈持平状态,无明显规律性,而 K 在 1 h 各计时时段内在坡度 25° 时流失量均出现最小值,其他坡度影响下流失量相差不大,无明显峰值。

在雨强 120 mm/h 的相同时间段内,K、Na、

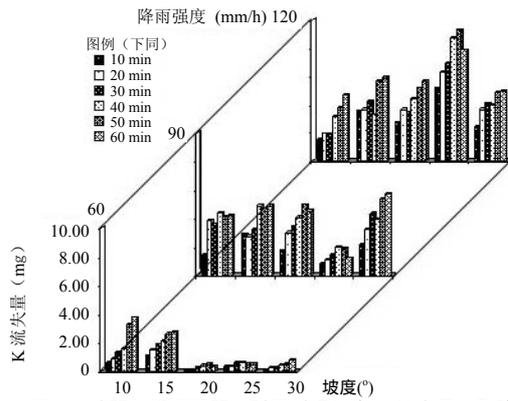


图 1 坡度、降雨强度、时段对径流中 K 流失量的影响

Fig. 1 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on K losses

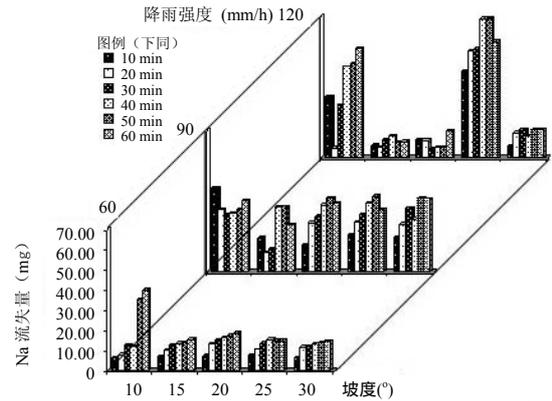


图 2 坡度、降雨强度、时段对径流中 Na 流失量的影响

Fig. 2 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Na losses

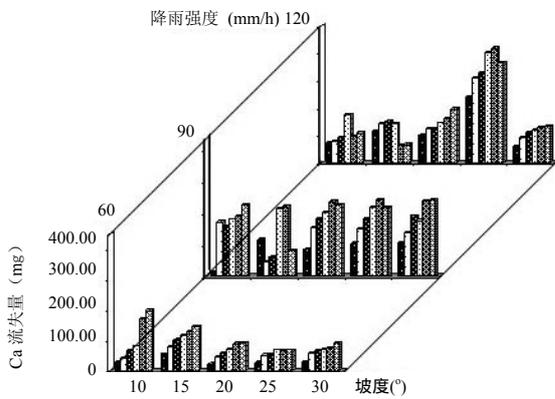


图 3 坡度、降雨强度、时段对径流中 Ca 流失量的影响

Fig. 3 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Ca losses

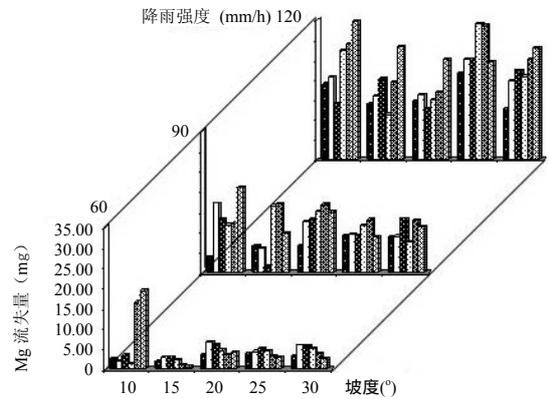


图 4 坡度、降雨强度、时段对径流中 Mg 流失量的影响

Fig. 4 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Mg losses

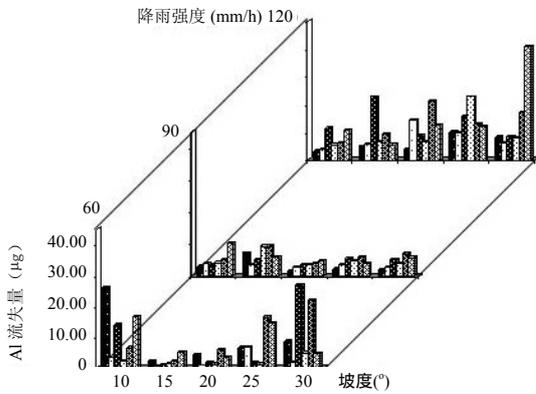


图 5 坡度、降雨强度、时段对径流中 Al 流失量的影响

Fig. 5 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Al losses

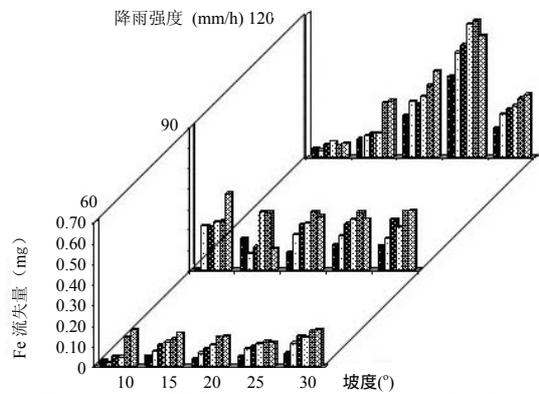


图 6 坡度、降雨强度、时段对径流中 Fe 流失量的影响

Fig. 6 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Fe losses

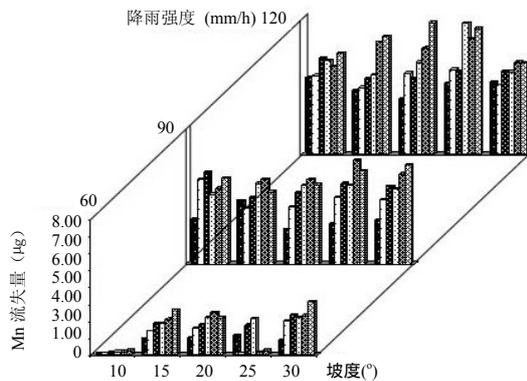


图 7 坡度、降雨强度、时段对径流中 Mn 流失量的影响

Fig. 7 Effect of slopes, rainfall intensities and rainfall durations on Mn losses

Ca、Mg、Fe、Mn 表现出相同的规律性, 在坡度 25° 时随时间变化其流失量均高于其他坡度, 出现最大值, 而 K 在坡度 10° 时的各时段流失量均最小, Fe 具有显著的规律性, 总体变化为 10° < 15° < 30° < 20° < 25°, Al 无明显规律。

从以上 3 种雨强作用下的分析中可以看出, 在雨强 60 mm/h 的相同降雨时间段内, K 与 Ca, Na 与 Mg, Fe 与 Mn 的流失量在坡度影响下具有相同的规律性, 在前 40 min 的相同时段, K、Ca 在坡度 15° 时高于其他坡度流失量值, 在第 50、60 min 时段, 在坡度 10° 时流失量最大。同样在第 10、20、30、40 min 时段内, Na、Mg 在坡度 20° 时的流失量高于其他坡度。在 1 h 的各个降雨时段内 Fe、Mn 均在坡度 30° 时流失量最大, 在坡度 10° 时最小。

2.3 不同时段各阳离子流失量的比较

通过对径流液的测试结果表明: 在坡度 10°、20°、25°、30° 情况下, K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn 在 3 种降雨强度条件下, 流失量均随降雨时间段的增加呈递增趋势, Al 在 60、120 mm/h 降雨条件下, 流失量最大值首先出现在第 30 min 时段内, 随着坡度的增加, 其流失量最大值出现的时间向后推移,

分别出现在第 40、50 min 时段内, 在 90 mm/h 雨强下的流失量随时间变化逐渐增加; 在坡度 15° 情况, 90、120 mm/h 雨强条件下, Na、Ca、Mg、Al、Fe 流失量最大值出现在第 40 min 和第 50 min 时段内, K、Mn 呈现出随时间段变化稳定的递增状态。这说明前面对 Al 的分析是正确的, 即阳离子随时间变化是有规律的, 因坡度增加, 径流量有所加大, 流速加快, 可能含有大量土粒随之流动, 但要使被固定在土壤黏粒矿物晶格中的阳离子释放溶解出来成自由离子态, 则需要一定的过程, 所以导致部分元素流失量的最大值出现时间向后推移。

2.4 径流中各阳离子的流失总量

雨强和坡度对流失量的影响, 许多研究^[10-12]认为, 坡面养分流失量以泥沙携带养分流失为主, 从 1 h 时段内的测试分析结果(表 1)得出, 不同雨强和坡度下径流液中均存在不同量的养分元素流失。其中以 Ca 流失量最大, K、Na、Mg、Fe 的流失量明显高于 Al、Mn 的流失量, Ca、Al 的流失量与初始土壤测试的矿质含量有明显差异, 这与土壤本身的性质存在着一定关系。从表 1 中可以看出在雨强一致和坡度一致条件下的 7 种阳离子流失量的整体表现。

表 1 1 h 内阳离子流失量

Table 1 Hourly cation losses

雨强 (mm/h)	坡度 (°)	K (mg)	Na (mg)	Ca (mg)	Mg (mg)	Al (μg)	Fe (mg)	Mn (μg)	总量 (mg)
60	10	11.50	113.32	580.45	45.33	68.83	0.47	0.93	751.08
	15	11.90	72.56	619.64	11.74	13.12	0.65	10.75	716.48
	20	2.18	87.61	374.00	28.56	17.46	0.58	11.07	492.94
	25	2.90	76.19	330.81	23.56	47.13	0.58	5.41	434.05
	30	2.33	71.25	381.81	25.90	69.00	0.81	12.75	482.10
90	10	23.60	153.63	949.45	79.38	29.01	1.28	26.45	1207.35
	15	21.23	124.97	1047.23	57.26	39.36	1.02	24.65	1251.71
	20	21.76	168.67	1091.28	79.43	19.19	1.26	23.70	1362.40
	25	17.50	172.95	1121.37	61.17	24.92	1.29	26.94	1379.28
	30	24.84	170.66	1116.01	73.01	25.62	1.31	26.28	1385.83
120	10	16.99	207.68	617.83	144.53	40.88	0.34	31.53	837.37
	15	26.13	47.93	678.23	108.88	135.10	0.97	30.45	862.14
	20	24.94	46.35	847.04	100.19	67.64	1.80	32.10	1020.33
	25	44.28	344.30	2054.66	163.43	83.25	3.38	36.11	1340.06
	30	23.86	71.61	637.97	128.25	88.93	1.44	28.88	1314.12

在 60 mm/h 降雨强度下: K、Ca 元素的流失量在坡度的影响下表现出同规律, 在坡度 15° 时流失量最大, 其后随着坡度的增加流失量有所减少; Na、Mg 元素的流失量在 10° 时最大, 在 20° 时次之; Al 在坡度 10° 时流失量较大, 其后随着坡度的增加流失量逐渐增加; Fe、Mn 元素的流失量基本保持一致, 初始流失量较大, 而后随着坡度的增加, 在坡度 30° 时流失量达到最大值。Na 在土壤中多呈离子态, 所以较大坡度即可达到较大的流失量; Ca 虽然在土壤中含量也较多, 但它容易被土壤固定, 流失大量出现的坡度较 Na 要大。Al、Fe、Mn 一般在北方土壤黏土矿物晶格或沉淀中存在, 在较长时间的降雨冲刷下, 加强土壤黏粒的混合与接触, 加速其释放成离子态, 所以在降雨最后时段流失量达到最大。

在 90 mm/h 降雨强度下: K、Fe 在坡度 30° 时流失量最大, Fe 流失过程呈缓慢递增趋势; Na、Ca、Mn 表现趋于一致, 在 25° 时流失量最大, 30° 时次之; Mg、Al 分别在坡度 20° 和 15° 达到流失量的最大值。各养分元素的流失量峰值除 Al 外, 均大于雨强 60 mm/h 条件下的最大流失量。

在 120 mm/h 降雨强度下: K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn 元素均在坡度 25° 时达到流失量最大峰值, 而 Al 在坡度 15° 时流失量最大。各元素流失量最大值均超出 90 mm/h 降雨强度下流失量最大峰值。

在坡度一致条件下, 各元素表现不尽一致。在坡度 10° 条件, Na、Mg、Mn 表现趋于一致, 随着雨强的增加流失量递增, 120 mm/h 时达到最大值, K、Ca、Fe 在雨强为 90 mm/h 时的流失量达到最大值, 而 Al 在 60 mm/h 时即具有流失量的最大值。在坡度 15° 条件, K、Mg、Al、Mn 随着雨强的增加流失量逐渐增多, 而 Na、Ca、Fe 均在雨强 90 mm/h 时达到流失量最大值。在坡度 20° 和 30° 条件下, 各元素流失量表现出受雨强影响的一致性规律, K、Mg、Fe、Mn 均呈现出随雨强增加的递增趋势, 而 Na、Ca 在 90 mm/h 时流失量最大, Al 在坡度 20° 时流失量随雨强增加而增大, 在 30° 时 90 mm/h 下流失量最大; 在坡度 25° 条件, K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn 流失量均随雨强增加而递增, Al 初始流失量较大, 在雨强 120 mm/h 下具有最大值, 说明坡度 25° 条件下阳离子流失量受雨强的影响较为明显。总流失量受到雨强、坡度、降雨时段的影响, 在不

同阶段、不同因素起主导作用, 这与各元素的地球化学和土壤化学性质有关, 有些理论还需要进一步探讨。

2.5 各阳离子流失总量的相关性分析

应用数理统计方法, 对雨强一致条件下随坡度改变各养分元素在 1 h 内的总体流失量进行了相关性分析。结果显示, 部分阳离子之间为协同效应, 在 60 mm/h 降雨强度下, K、Ca 之间存在相关性, 相关系数为 0.974, Na、Mg 之间达到 0.896; 在 90 mm/h 降雨强度下, Na 与 Ca、Fe 之间呈正相关, 相关系数分别为 0.998、0.933, 与 Al 之间呈负相关, 相关系数为 -0.920, Ca 和 Al 之间相关系数为 -0.924, Ca、Fe 之间的相关系数为 0.909; 120 mm/h 降雨强度下, K 和 Ca、Fe 之间的相关系数分别达到 0.953 和 0.948, Ca、Fe 之间达到 0.921, Na、Mg 之间表现出较强的相关性, 相关系数为 0.942, Ca、Mn 之间达到 0.920。一般情况下, Al 与其他重金属元素易成负相关, 其原因是 Al 在土壤中多为两性化合物存在, 易与重金属形成大分子络合物或沉淀, 所以径流水中 Al 离子含量增多则 Ca、Na 离子含量减少。

2.6 径流量与 7 种阳离子流失总量

短时间段内雨强和坡度对径流中养分元素含量变化影响不显著, 并不表示长时间内雨强和坡度与径流携带的养分流失量没有关系。因为径流携带的养分流失量不仅取决于径流中养分元素的种类, 而且还与坡面径流量存在相关性。以往研究证实^[13, 14], 雨强和坡度与坡面径流量呈正相关关系, 雨强和坡度是通过影响径流量来影响其携带养分元素的流失量。本实验表明, 在相同降雨强度下, 1 h 时间段内, 雨强 60 mm/h 和 90 mm/h 下的径流量均随坡度的增加而增大, 120 mm/h 下的径流量随坡度递增无明显改变, 在相同坡度下, 随着降雨强度的改变径流量有明显的规律性, 其表现为 60 mm/h < 90 mm/h < 120 mm/h, 由此可说明在 0°~30° 坡度范围内, 降雨强度对径流量的影响已远远超过了坡度的影响, 在坡度变化较缓的情况下, 雨强对阳离子流失量起着决定性的作用。通过对不同雨强下养分元素总体流失量峰值的分析也体现出了这一点。

为了细致分析坡度对养分元素流失量的影响, 把 K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn 7 种元素进行总合, 计算其累计流失总量与径流量之间在坡度递增条件下的相关关系, 表 2 列出了相同降雨强度, 不同坡度影响下的坡面径流量中养分元素流失总量与

径流量之间的回归方程。

从表2中可以看出K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn的总流失量与在坡度的影响下,在60 mm/h雨

强下随坡度的增加总流失量呈现缓慢递减状态,而在90 mm/h和120 mm/h条件下呈递增态势,与径流量之间均表现出明显的二次曲线关系。

表2 3种雨强下K、Na、Ca、Mg、Fe流失总量与径流量回归方程

Table 2 Regression equations for runoffs and losses of K, Na, Ca, Mg, and Fe under three rainfall intensities

流失总量 Y (mg)	回归方程 (径流量 X, ml)	复相关系数平方 (R ²)
Y ₁ (60 mm/h)	$2608.20 - 7 \times 10^{-5} X_1^2$	0.948
Y ₂ (90 mm/h)	$-4836.4 + 1.33 X_2 - 7 \times 10^{-5} X_2^2$	0.920
Y ₃ (120 mm/h)	$157312 - 24.73 X_3 + 0.01 X_3^2$	0.921

3 结论

雨强、坡度和不同降雨时间段对径流中阳离子的流失均起着不同的影响作用,通过对坡面径流中7种阳离子流失量的动态观测,在坡度和降雨时间段相同时,径流中大部分阳离子表现出随着降雨强度的增加,流失量增加,即60 mm/h < 90 mm/h < 120 mm/h,以K、Mg、Fe、Mn规律性较好。在相同雨强和降雨时间段下,坡度的改变与各阳离子流失量变化关系不明显,但对流失量的峰值有明显作用。在坡度、雨强一致时,养分元素的流失量呈现出随着降雨时间的递增逐渐增加的趋势,这是因为短时间段内,随着降雨时间的加长,坡面径流速率逐渐增加,径流流失量加大,携带养分流失量也跟着增加。

坡度和雨强对10 min计时段和60 min计时段,两种情况下养分元素流失量影响基本一致。同雨强1 h时段内不同的阳离子的流失总量之间随坡度的变化存在相关性,在60、120 mm/h降雨强度下,K、Ca之间均存在较大的相关系数,在90 mm/h降雨强度下,Na与Ca、Fe之间呈正相关,与Al呈负相关。K、Na、Ca、Mg、Al、Fe、Mn阳离子的流失总量与径流量之间在相同降雨强度下随坡度变化均存在二次曲线关系,复相关系数平方(R²) > 0.9。

由于坡面土壤阳离子流失是坡地土壤养分变化过程的主体部分,按养分元素流失方式又可分为侵蚀泥沙和径流水携带两个部分,不同的降雨条件,坡度及侵蚀产生部位对泥沙和径流水携带的养分迁移、流失量具有不同的影响。测试分析结果表明,坡面土壤养分除以径流携带泥沙流失量为主外,径流中所含有的阳离子也构成总体养分流失不容忽视的部分。对于小流域的水土保持措施的实施与空间规划,径流水中阳离子流失量也应作以适当考虑。

参考文献

- 1 郑子成, 吴发启, 何淑勤. 耕作措施对产流作用的研究. 土壤, 2004, 36 (3): 327 ~ 330
- 2 Zhang NM, Yu Y, Hong B, Chen JJ, Zhang YJ. Factors influencing runoff P losses from farmlands of the Dianchi Lake watershed in Yunnan. Pedosphere, 2004, 14 (2): 259 ~ 262
- 3 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点. 土壤学报, 2002, 39 (1): 71 ~ 80
- 4 吕俊杰, 杨浩. 水土流失对水环境影响研究进展. 土壤, 2003, 35 (3): 198 ~ 203
- 5 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响. 水土保持学报, 2002, 16 (2): 33 ~ 36
- 6 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (1): 71 ~ 74
- 7 邵明安. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型. 科技前沿与学术评论, 2003, 23 (2): 7 ~ 12
- 8 Wang XX, Zhang TL, Zhang B. Nutrient cycling and balance of sloping upland ecosystems on red soil. Acta Ecology Sinica, 1999, 19 (3): 335 ~ 341
- 9 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 1999
- 10 毕银丽, 王百群. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关系. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3 (3): 1 ~ 9
- 11 VanDyke LS, Pease JW, Bosch DJ, et al. Nutrient management planning on four Virginia livestock farms: Impacts on income and nutrient losses. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 54 (2): 500 ~ 504
- 12 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 张光远. 坡地等高植物篱带间

- 距对表土养分流失的影响. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5 (2): 24 ~ 28
- 13 Aschmann SG, Anderson DP, Croft RJ, et al. Using a watershed nutrient dynamics model, WEND, to address watershed-scale nutrient management challenge. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54 (4): 631 ~ 635
- 14 Sims JT, Simard RR, Joern BC. Phosphorus losses in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27: 277 ~ 292

EFFECTS OF RAINFALL INTENSITY AND SLOPE ON LOSSES OF CATIONS WITH RUNOFF

LI Jun-bo¹ HUA Luo¹ CAI Dian-xiong² FENG Yan¹ ZHU Feng-yun¹

(1 *The Key Lab of Resources Environment & GIS in Beijing City, Capital Normal University, Beijing 100037;*

2 Soil and Fertilizers Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract An indoor rainfall simulation experiment was designed according to the landform of the slope lands around the Miyun Reservoir and carried out with the aid of the ICP-MS mass spectrum analyzing technology, to determine regularities of the loss of seven different kinds of metal cations with surface runoff from fields of cinnamon soil different in slope under different rainfall intensities and durations. Results showed that when the slopes and rainfall durations were the same, cation losses increased gradually with rainfall intensity, which fitted more K, Mg, Fe and Mn. When intensities and durations of the rainfalls were the same, the occurrence of maximum cation losses disagreed with the slopes, but when the rainfall intensity was 120mm/h and slope was 25° the losses of K, Na, Ca, Mg, and Fe all reached maximum. When the slopes and the rainfall intensities were the same, the losses of cations increased with the duration of rainfalls. Relativities were also found between the total losses of different cations with the change in slope. For example, when the rainfall intensity was at 60mm/h and 120mm/h, the correlation coefficients of K losses and Ca losses were 0.974 and 0.953 separately. The loss of each cation within a duration was little related to volume of the runoff. But when the rainfall intensities were the same, quadratic curve relations existed between hourly total losses of seven different kinds of cations and volumes of runoff with the slope, and the square of multiple correlation coefficient is bigger than 0.9.

Key words Rainfall intensity, Slope, Runoff, Duration of raining, Cation loss