

岩溶槽谷区坡面土壤磷素流失过程与影响因素 ——以中梁山龙凤槽谷试验场为例

马丽娜, 蒋勇军, 张彩云, 汪啟容

(西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 为揭示自然降雨条件下岩溶槽谷区坡面土壤磷素流失规律, 分析坡面径流和侵蚀泥沙中各形态磷素的迁移流失过程, 并着重探讨降雨条件、土地利用方式因素对磷素流失的影响。在重庆市中梁山龙凤槽谷区设置耕地、林地和果园地 3 个标准径流小区 (20 m×5 m), 对坡面径流及泥沙中的磷素流失开展为期 1 年的监测。结果表明: (1) 坡面土壤磷素流失强烈依赖于坡面产流产沙过程, 槽谷区土壤磷素流失以径流流失为主, 泥沙流失为辅; (2) 总体来看, 不同土地利用方式总磷 (TP) 流失总负荷表现为耕地>果园地>林地, 耕地 TP 流失总负荷为 0.17 kg/hm², 约是果园地的 1.76 倍和林地的 4.68 倍; (3) 径流中磷素浓度变化受降雨强度控制, 雨季初期径流中磷素流失形态以水溶性总磷 (TDP) 为主, 其余降雨事件则以颗粒态磷 (PP) 为主, $\rho(\text{PP})/\rho(\text{TP})$ 的比例为 63.92%~96.97%; (4) 泥沙中磷素浓度变化受降雨强度影响较小, 泥沙磷素存在富集现象, 且全磷富集比 (ER_{STP}) 与雨强无明显相关关系。

关键词: 岩溶槽谷区; 流失路径; 土地利用方式; 磷素流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0265-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.037

Process of Soil Phosphorus Loss on a Slope of Karst Trough Valley and Influencing Factors

— A Case Study of Longfeng Trough Valley Test Site in Zhongliang Mountain, Chongqing, China

MA Lina, JIANG Yongjun, ZHANG Caiyun, WANG Qirong

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of

Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: In order to reveal the law of phosphorus loss on a slope of karst valley under natural rainfall conditions, the migration process of different forms of phosphorus through the two transport pathways (slope runoff and erosion sediment) was analyzed, and the influence of rainfall conditions and land use patterns on phosphorus loss was emphatically discussed. Three standard runoff plots (20 m×5 m) of cultivated land, forest land, and orchard land were set up in Longfeng trough valley to monitor the phosphorus loss for one year. The results showed that: (1) Phosphorus loss was strongly dependent on the process of runoff and sediment generation. (2) In general, the total loss of phosphorus decreased in the order: cultivated land>orchard land>forest land. The total loss of phosphorus in cultivated land was 0.17 kg/hm², which was about 1.76 times that of orchard land and 4.68 times that of forest land. (3) The change of phosphorus concentration in slope runoff was controlled by the rainfall intensity. The significant form of phosphorus loss in slope runoff was dissolved phosphorus (TDP) at the beginning of the rainy season, while in other rainfall runoff events particulate phosphorus (PP) was the primary form which accounted for 63.92%~96.97% of the total amount of phosphorus runoff loss. (4) The change of phosphorus concentration in sediment was less affected by the rainfall intensity, and the sediment had the enrichment effect of phosphorus, there was no obvious correlation between the enrichment ratio of total phosphorus (ER_{STP}) and rainfall intensity.

Keywords: karst valley; loss path; land use pattern; phosphorus loss

磷素是动植物生长必需的营养元素,同时也是造成水体富营养化的主要限制因素^[1-2],受到人们的广泛关注。土壤磷素的迁移流失受坡地水文过程驱动,可以通过坡面径流、泥沙携带、向下淋滤不同路径迁移到下游接纳水体中^[2-3]。岩溶区土层浅薄、质地黏重,磷素易被碳酸钙或物理性黏粒吸附固定,在土层中不断积累,淋溶作用下也不易向下移动^[4-5],故首先关注磷素横向流失路径,即随坡面径流和侵蚀泥沙的迁移流失过程。区域地质背景复杂,裂隙管道广泛发育,径流及泥沙携带的磷素部分滞留其中,部分则直接进入地下河^[6],因此坡面土壤磷素流失最终会引发岩溶地区土壤质量下降和水环境污染的双重威胁。

坡面径流中磷素流失形态包括水溶性磷和颗粒态磷两部分,一般情况下,径流中磷素流失形态以颗粒态磷为主^[2],而当土壤磷素水平高^[7]或者土壤前期经历较长干燥期^[8]等情况下,径流中磷素流失形态则以水溶性磷为主。侵蚀泥沙携带也是土壤磷素流失的重要路径,与径流中磷素流失具有同样的环境影响。土壤磷素流失受到降雨条件、土壤生化过程、土地利用方式及管理实践等因素共同控制^[9],降雨是诱发土壤磷素流失最重要的驱动力,短历时强降雨事件是造成坡面水土流失和养分流失的关键因素^[10];径流中水溶性磷的浓度取决于土壤中磷酸根的释放和保存^[11],当前期土壤水分较低时,土壤中微生物磷释放,径流中水溶性磷流失增加^[12],侵蚀搬运过程中土壤有机质矿化速率增加也会促进水溶性磷的释放^[13];提高植被覆盖率可有效拦截磷素输出过程,使得磷素浓度变化过程平缓,泥沙携带磷素减少,但对水溶性磷的拦截微弱^[14];翻耕可破坏土壤结构从而加剧土壤磷素流失^[15]。近年来,学术界也逐步关注到岩溶区土壤磷素流失,并开展一系列研究,如高儒学等^[16]对岩溶区坡耕地磷素流失特征研究表明,磷素随径流和泥沙流失量相当,且磷素流失浓度及流失负荷随雨强的增大而增大;也有学者^[17]从农艺管理角度如施肥类型、施肥水平考虑其对土壤磷素流失的影响;此外还有学者^[18]讨论岩溶区土壤理化性质对土壤磷素含量的影响发现,土壤磷素主要受土壤有机质含量控制。

整体来看,前人多采用室内人工模拟方法对土壤磷素流失过程进行研究,野外定量研究比较薄弱,集中于田间管理对土壤磷素流失的影响,磷素随不同流失路径的迁移机制有待深入研究。相较于黄土坡地^[19]、红壤坡地^[20]等其他研究区域,对岩溶区土壤磷素流失过程及其影响因素了解较少。故本研究以重庆市中梁山背斜顶部龙凤槽谷为研究基地,根据不

同土地利用方式设立 3 个标准径流小区,为揭示岩溶槽谷区坡面土壤磷素流失规律,监测自然降雨条件坡面产流产沙过程,分析比较磷素随坡面径流和侵蚀泥沙迁移流失过程,并着重探讨降雨条件、土地利用方式因素对磷素流失的影响,深入了解磷素流失机制,以为岩溶区坡面水土流失防治以及面源污染防治提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区中梁山龙凤槽谷区(106°25′—106°29′E, 29°45′—29°50′N)(图 1),属中亚热带季风气候,冬暖夏热,年均气温 18℃,降雨充沛,但分配不均,年均降水量为 1 000~1 300 mm,雨季为 4—10 月。土壤类型以石灰土为主,土层薄且分布不均匀。植物喜钙耐旱主要分布有马尾松、竹林、次生灌木丛和多年生草本。

龙凤槽谷区属于川东平行岭谷华蓥山帚状褶皱东南沿部分,地质构造为观音峡复式背斜,海拔为 480~640 m,总体呈“一山三岭二槽”笔架式地貌格局。背斜轴向为 NNE 走向,背斜核部发育有东、西两溶蚀槽谷。核部的碳酸盐岩被两侧的非可溶岩地层包围,核部为下三叠统飞仙关组(T_1f)地层,向两翼地层逐渐过渡为下三叠统嘉陵江组(T_1j)、中三叠统雷口坡组(T_2l)及上三叠统须家河组(T_3xj)。龙凤槽谷区面积约为 11 km²,且东槽面积显著大于西槽,东、西槽各发育 1 条地下河,分别为凤凰和龙车地下河,长均为 7 km,向东北注入嘉陵江,径流小区位于东槽区凤凰村附近。

1.2 径流小区设置

龙凤槽谷区土地主要类型分别为林地、耕地及建设用地,3 种土地利用类型面积所占槽谷区总面积比例分别为 58.1%, 35.8%, 6.1%。根据地质地貌特点、生态环境以及人类活动等方面的差异性,在槽谷区选择 3 种典型的土地利用方式(耕地、林地、果园地)构成 3 个标准径流小区,其水平投影坡长 20 m,宽 5 m,基本信息见表 1。径流小区的修建方法采用四周开挖深沟到达基岩后浇筑钢筋混凝土隔水墙,墙体高出地面约 20 cm,保证土壤—表层岩溶带原有结构不受干扰,同时保证径流小区内部与外界不发生水分交换。在径流小区围墙下端设有集流池(0.5 m×0.4 m),每个集流池安装有不锈钢三角堰。耕地和果园地小区根据杂草生长情况不定期除草,耕地以种植蔬菜为主,种植种类会依据槽上农户的种植情况进行适当调整,2017 年 6 月 12 日和 2018 年 4 月 23 日对耕地和果园地施用磷肥,每次耕地施肥量为 200 kg/

hm²,果园地施肥量为 150 kg/hm²,林地保持原貌, 尽量减少人为干扰。

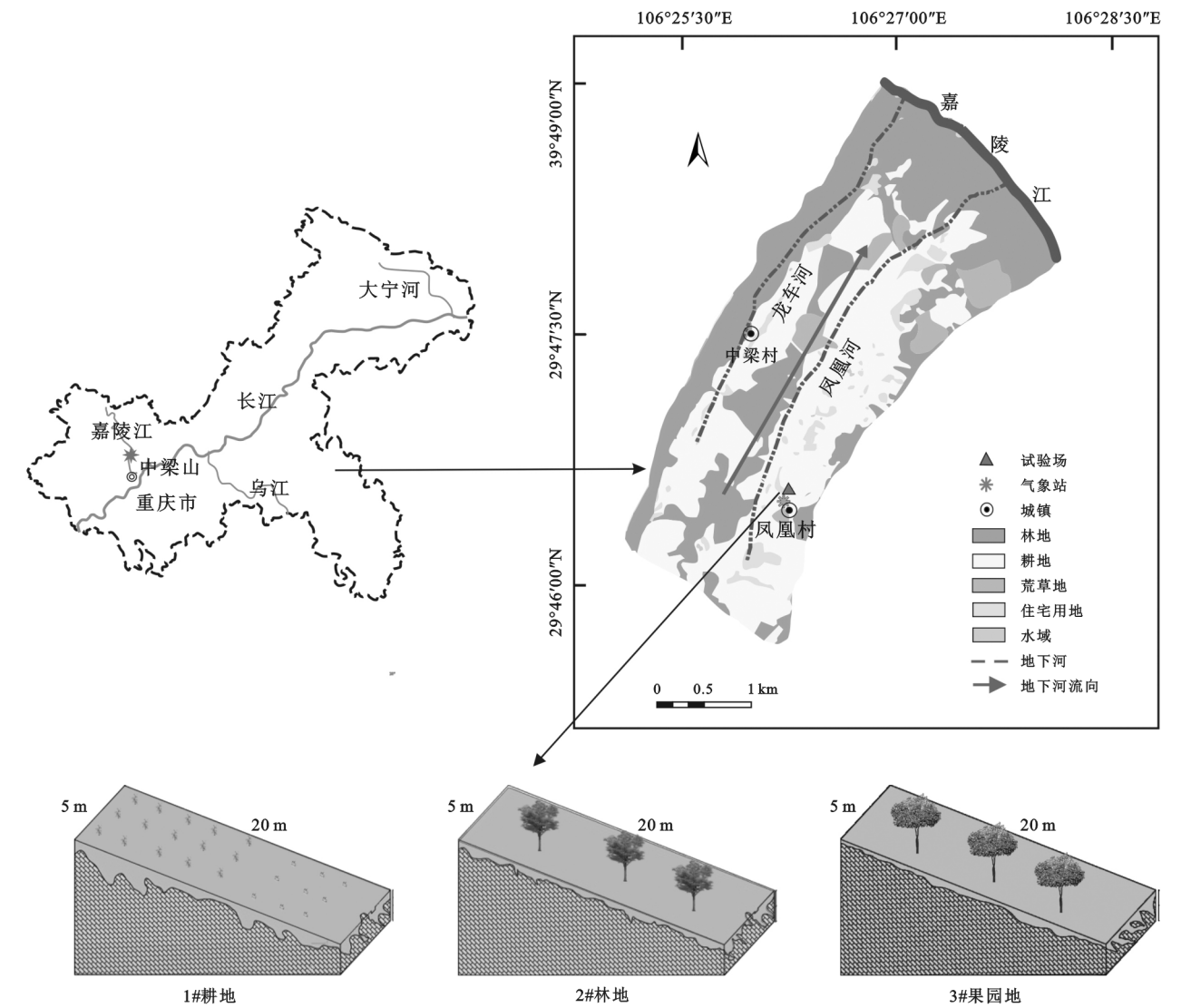


图 1 研究区概况及径流小区示意

表 1 径流小区基本信息

径流小区 编号	土地利用 方式	坡长/m	宽/m	海拔 高度/m	坡度/(°)	倾向/(°)	土层 厚度/cm	植被 覆盖率/%	主要植被 类型
1#	耕地	20	5	561	20	155	30	15	辣椒、番茄、白菜等
2#	林地	20	5	561	20	155	35	80	洋槐、白蜡、棕榈等
3#	果园	20	5	561	20	155	30	30	柑橘树

1.3 观测指标与方法

仪器监测:降水过程采用自动气象监测站 (DAVISVantagePro2,天津气象仪器厂有限公司,中国)实时监测,精度为±0.2 mm,测量间隔为 15 min,获取每场雨的降雨量、15 min 最大雨强 I_{15} 、降雨历时,并统计相邻 2 场降雨事件的间隔天数。

坡面径流过程:集流池中安装 HOBO 水位计(北京智阳科技有限公司,中国)进行实时监测,测量间隔为 15 min,利用公式 $Q = \text{长} \times \text{宽} \times \Delta h$ 将记录的水位换算为流量。

水样收集与测定:每场降雨结束后现场采集水样

加酸保存带回实验室进行测定分析。总磷 $\rho(\text{TP})$:原水经过硫酸钾消解后,采用钼锑抗比色法测定;水溶性总磷 $\rho(\text{TDP})$:取部分水样过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜,再经过硫酸钾消解后,采用钼锑抗比色法测定;颗粒态磷 $\rho(\text{PP})$ 通过差减法得到, $\rho(\text{PP}) = \rho(\text{TP}) - \rho(\text{TDP})$,各指标重复 3 次,取平均值。

泥沙收集与测定:每场降雨结束后将沉积在池底的泥沙带回,静置风干后称重,得到坡面产沙量。泥沙全磷 $\rho(\text{STP})$ 采用氢氧化钠—钼锑抗比色法测定,泥沙有效磷 $\rho(\text{SAP})$ 采用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定。

土壤采集及养分测定:采用五点采样法采集 0—20 cm 表层土壤 1 kg,样品自然风干弃去碎石和草根后用玛瑙研钵磨碎过筛,pH 采用电位法(DDS—307 电导仪和奥立龙 868 酸度计,水土比为 1:5)测定,

有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,土壤全磷、有效磷的测定方法与泥沙相同,土壤全氮采用半微量凯氏测定,粒径组成采用比重法,具体操作方法见文献[21],测试结果见表 2。

表 2 径流小区土壤理化性质

土地利用 方式	土壤 pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	粒径组成/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
耕地	8.07	52.68	3.17	454.19	3.30	33	52	15
林地	7.89	33.69	2.17	384.87	5.56	43	47	10
果园	7.99	46.81	2.79	437.46	5.70	35	51	14

1.4 数据处理

单场降雨事件坡面径流中各形态磷素流失负荷和各形态磷素流失总负荷计算公式为:

$$Q_i=c_i\times V_i\times 10^{-6}\tag{1}$$

$$Q_{\text{径流}}=\sum_{i=1}^{n_Q}(Q_i\times 100)\tag{2}$$

式中:Q_i为各小区第*i*次降雨坡面径流中各形态磷素流失负荷(kg);*c_i*为第*i*次降雨坡面径流中各形态磷素浓度(mg/L);*V_i*为第*i*次降雨坡面径流量(L);*Q_{径流}*为各形态磷素流失总负荷(kg/hm²);*n_Q*为坡面产流总次数,本文中*n_Q*为 13;100 为单位转换系数。

单场降雨事件侵蚀泥沙中各形态磷素流失负荷和各形态磷素流失总负荷计算公式为:

$$S_i=d_i\times M_i\times 10^{-6}\tag{3}$$

$$S_{\text{泥沙}}=\sum_{i=1}^{n_S}S_i\tag{4}$$

式中:*S_i*为各小区第*i*次降雨侵蚀泥沙中各形态磷素流失负荷(kg);*d_i*为第*i*次降雨侵蚀泥沙中各形态磷素浓度(mg/kg);*M_i*为第*i*次降雨坡面产沙量(kg/hm²);*S_{泥沙}*为各形态磷素流失总负荷(kg/hm²);*n_s*为坡面产沙总次数,本文中*n_s*为 8。

泥沙中各形态磷素富集比 *ER* 计算公式为:

$$ER_{\text{STP}}=\text{STP 泥沙}/\text{STP 土壤}\tag{5}$$

$$ER_{\text{SAP}}=\text{SAP 泥沙}/\text{SAP 土壤}\tag{6}$$

式中:*ER_{STP}*为泥沙全磷富集比;*ER_{SAP}*为泥沙有效磷富集比;STP_{泥沙}、SAP_{泥沙}分别为泥沙中全磷、有效磷含量(mg/kg);STP_{土壤}、SAP_{土壤}分别为母体土壤中全磷、有效磷含量(mg/kg)。

试验数据利用 SPSS 21.0 软件进行层次聚类分析,Canoco 5.0 软件进行冗余分析,采用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙过程

2017 年 6 月 1 日到 2018 年 5 月 31 日期间共收集 13 场侵蚀性降雨事件,降雨总量达到 377.20 mm,

最大单次降雨量为 63.60 mm,利用层次聚类法根据降雨量、降雨历时、15 min 最大雨强 *I*₁₅ 将其分为 3 种降雨类型,降雨类型 I 代表极端暴雨事件,降雨类型 II 代表短历时强降雨事件,降雨类型 III 则代表长历时降雨事件。由表 3 可知,雨季多发生短历时强降雨事件,旱季多发生长历时降雨事件。

每场降雨事件均有产流发生,共发生 13 场产流事件。从图 2 可以看出,坡面产流过程对降雨过程响应良好,坡面径流量随降雨量的增加而增加,并在 2017 年 8 月 25 日极端暴雨事件中坡面径流量达到最大值,通过表 3 计算得出,该场降雨事件中耕地、林地及果园地坡面径流量分别占各自径流总量的 43.45%,45.41%,46.51%。纵观整个观测期,耕地坡面径流量最大,果园地次之,林地最小。

观测期共发生 8 场产沙事件,旱季不产沙。坡面产沙过程集中于 3 场强降雨事件,其单场暴雨事件中耕地、林地及果园地坡面产沙量分别占各自产沙总量的 65.69%,71.86%,64.63%,暴雨条件下,雨滴强烈击溅坡面土壤,坡面径流的侵蚀搬运能力强,故坡面土壤侵蚀严重。整个观测期,耕地坡面产沙量最大,果园地次之,林地最小,与径流中观察的结果一致。

2.2 磷素随坡面径流迁移流失过程

2.2.1 径流中磷素浓度流失过程 坡面径流是土壤磷素流失的重要路径,水是土壤磷素迁移的载体和溶剂。观察自然降雨条件下坡面径流中 ρ(TP)的变化(图 2)可知,ρ(TP)的变化与降雨量和坡面径流量的变化不完全一致,2017 年 8 月 25 日降雨量和径流量都达到观测期的最大值,但径流中 ρ(TP)并未达到最大值,而是在 2017 年 7 月 17 日降雨事件中达到了最大值,这可能与径流量对磷素浓度的稀释作用有关^[22]。与之相比,2017 年 7 月 17 日降雨事件,降雨量虽小,但降雨历时短且降雨强度大,短时内坡面受到雨水的强烈冲刷,故径流中 ρ(TP)最高。2017 年 10 月至 2018 年 3 月底期间,降雨量小且强度较弱,径流中 ρ(TP)变化较小。雨季初,土壤颗粒复湿后

均匀分散,保存其中的土壤微生物磷释放,径流中 ρ (TP)增加,4 月底农事活动较为频繁,故之后降雨事件中耕地和果园地径流中 ρ (TP)快速回升,而林地人为扰动少,径流中 ρ (TP)变化平缓。

从流失形态组成来看, ρ (TDP)、 ρ (PP)和 ρ (TP)

的变化趋势基本一致,值得注意的是,雨季初期(2018 月 4 月 15 日), ρ (TDP)/ ρ (TP)的比例高达 64.26%,可见 TDP 是径流磷素流失的主要形态。除雨季初期外,径流磷素流失形态以 PP 为主, ρ (PP)/ ρ (TP)的比例为 63.92%~96.97%。

表 3 自然降雨特征及坡面产流产沙量

降雨日期 (年-月-日)	降雨特征				降雨 类型	坡面径流量/L			坡面产沙量/(kg·hm ⁻²)		
	降雨量/ mm	降雨 历时/h	I_{15} / (mm·h ⁻¹)	间隔 天数/d		1#	2#	3#	1#	2#	3#
2017-06-09	24.00	4.75	43.20	4 [*]	II	135.50	20.49	59.77	1.83	0.85	1.35
2017-07-06	17.40	5.00	13.20	7 [*]	II	20.52	1.22	2.48	1.21	0.31	0.51
2017-07-17	21.40	1.75	44.80	3 [*]	II	123.35	12.92	71.34	1.62	0.82	1.33
2017-08-08	30.60	6.50	32.80	4 [*]	II	228.39	32.48	53.36	15.68	5.64	12.89
2017-08-25	63.60	16.25	63.20	19	I	819.70	360.52	564.69	60.80	36.12	45.71
2017-08-29	16.73	5.75	20.00	2	II	162.31	43.88	46.65	1.01	0.21	0.41
2017-10-06	22.24	27.25	6.08	4 [*]	III	37.54	33.74	70.66	0	0	0
2017-11-05	21.02	27.00	5.08	15 [*]	III	64.86	42.09	67.96	0	0	0
2017-11-17	12.78	15.75	2.04	10 [*]	III	46.87	39.01	40.71	0	0	0
2018-03-24	25.55	11.75	11.16	17 [*]	III	50.84	51.87	60.27	0	0	0
2018-04-15	26.04	16.75	4.00	14 [*]	III	59.04	55.14	61.70	0	0	0
2018-04-20	45.90	24.00	16.80	5	III	47.97	47.56	37.11	1.97	0	1.40
2018-05-12	49.94	9.75	17.60	7 [*]	II	89.50	53.00	77.50	8.42	6.31	7.14

注: * 表示与前期虽发生降雨但未产流事件的间隔天数。

从土地利用方式来看,耕地、林地和果园地径流 ρ (TDP)、 ρ (PP)和 ρ (TP)流失规律基本一致,由大到小整体表现为耕地>果园地>林地,当水体中 ρ (TP)超过 0.02 mg/L,则视为能够引起水体富营养化^[23],因此,观测期侵蚀性降雨引起的耕地、林地和果园地坡面径流进入受纳水体后均会在一定程度上对水质产生富营养化威胁,相较于耕地和果园地,林地对土壤磷素的调控能力最好。

2.2.2 径流中磷素流失负荷特征 径流中磷素流失负荷不仅与磷素浓度有关,还与径流量密切相关。自然降雨条件下径流中 TP、PP 和 TDP 流失负荷变化与径流量的变化基本一致,并在 2017 年 8 月 25 日极端暴雨事件中达到观测期的最大值,可见径流量对径流磷素流失负荷的影响大于磷素浓度的影响。

不同土地利用方式径流中磷素流失负荷变化与浓度保持一致,由大到小整体表现为耕地>果园地>林地。耕地径流 TP 流失总负荷为 0.13 kg/hm²,分别是果园地和林地的 2.36,6.83 倍。对比流失形态组成发现,耕地径流 TDP 和 PP 对 TP 的贡献率分别为 20.20%和 79.80%,果园地径流 TDP 和 PP 对其 TP 的贡献率分别为 21.71%和 78.29%,与耕地接近;林地径流 TDP 和 PP 对 TP 的贡献率分别为 25.28%和 74.72%,相较于耕地和果园地,林地径流中 PP 对 TP 的贡献率较

低,说明林地对于 PP 的削减效果较好。

2.3 磷素随侵蚀泥沙迁移流失过程

2.3.1 泥沙中磷素浓度流失过程 泥沙是土壤磷素流失的又一重要路径,雨滴击溅冲刷坡面,水流汇聚使得富含磷素的土壤颗粒伴随径流流失。从图 3 可以看出, ρ (STP)的变化与降雨量和坡面产沙量的变化不一致,坡面产沙量随着降雨量增加而增加,但泥沙中 ρ (STP)并未随之增加,可见泥沙中磷素浓度不仅与降雨条件有关,还受土壤磷素水平的影响。2017 年 7 月 17 日降雨事件中泥沙 ρ (STP)达到最大值,与径流中观察到的结果一致,2017 年 8 月 29 日降雨事件泥沙 ρ (STP)降到了最小值,因前期极端暴雨(2017 年 8 月 25 日)强烈冲刷坡面,坡面表层土被暴雨冲刷,磷素含量相对低的次表土裸露接受冲刷,故泥沙中磷素含量相对较低。经过整个旱季,雨季初期泥沙 ρ (STP)回升,存在降雨初期冲刷效应。

从流失形态组成来看,与泥沙中 ρ (STP)相比, ρ (SAP)随降雨量增加表现出增加的趋势。与母体土壤相比,泥沙中 STP 和 SAP 均有富集现象(图 4), ER_{STP} 为 0.57~1.45, ER_{SAP} 为 0.37~4.80。不同降雨事件中 ER_{SAP} 波动变化大,而 ER_{STP} 值均接近 1,可见 ER_{STP} 与雨强无明显相关关系。

从土地利用方式来看,泥沙中 ρ (STP)和

$\rho(\text{SAP})$ 变化规律基本一致,由大到小整体表现为果园地>耕地>林地。

由图 4 可知,耕地和果园地泥沙中存在磷素富集现

象,耕地和果园地受到人为施肥的影响,表层土壤磷素积累,加上土壤疏松,植被覆盖率低拦截弱,富含磷素的细颗粒物优先被径流运出,故泥沙中磷素含量较高。

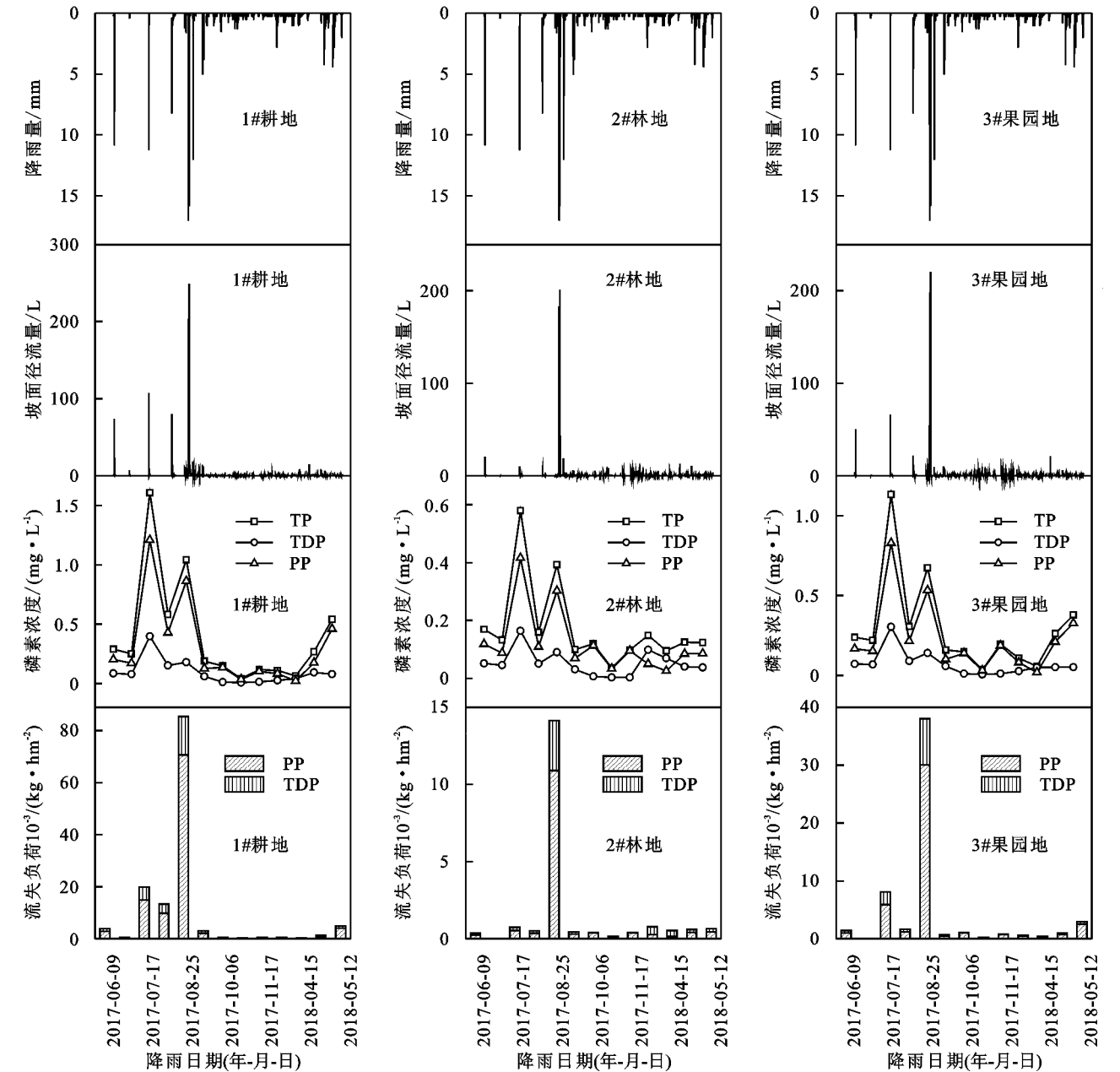


图 2 坡面径流中磷素浓度及流失负荷流失过程

2.3.2 泥沙中磷素流失负荷特征 自然降雨条件下侵蚀泥沙中 STP 和 SAP 流失负荷与坡面产沙量的变化相吻合,泥沙磷素流失主要集中于 3 场降雨产沙事件,2017 年 8 月 25 日降雨产沙事件中的磷素流失负荷甚至大于其余降雨产沙事件中磷素流失总负荷,可见泥沙磷素流失强烈依赖于坡面产沙过程。

不同土地利用方式侵蚀泥沙中 STP 和 SAP 流失负荷由大到小整体表现为果园地>耕地>林地,果园地泥沙 STP 流失负荷为 0.03 kg/hm²,分别是耕地和林地的 1.19,7.40 倍。泥沙有效磷对其全磷的贡献很小,这主要因土壤中有效磷含量通常很低,大多以植物难以利用的无效态磷形式存在。

3 讨论

3.1 不同流失路径的差异性

坡面土壤磷素流失依赖径流和泥沙 2 条路径,磷素流失以水流迁移为动力,泥沙为载体。由于土壤吸附固持作用,磷素极易与土壤有机质和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等发生化学反应而被固定^[7],径流溶解和浸提磷素的能力有限^[2],故径流中磷素含量远小于泥沙中磷素含量。比较不同流失路径总磷流失总负荷(图 5)发现,岩溶槽谷区土壤磷素流失以径流流失为主,泥沙流失为辅,通过计算得出,2 条流失路径磷素负荷比在耕地、林地和果园地中分别为 4.64,1.25 和

2.06,耕地中径流流失远大于泥沙流失,果园地次之,林地中2条流失路径大致相当。林地植被覆盖率高,群落结构复杂,可有效削弱径流拦截泥沙,人为干扰少,坡面产流产沙量远小于耕地和果园地,进而减少土壤磷素流失负荷,这说明控制坡面水文产流过程是防治坡面土壤磷素流失的关键。

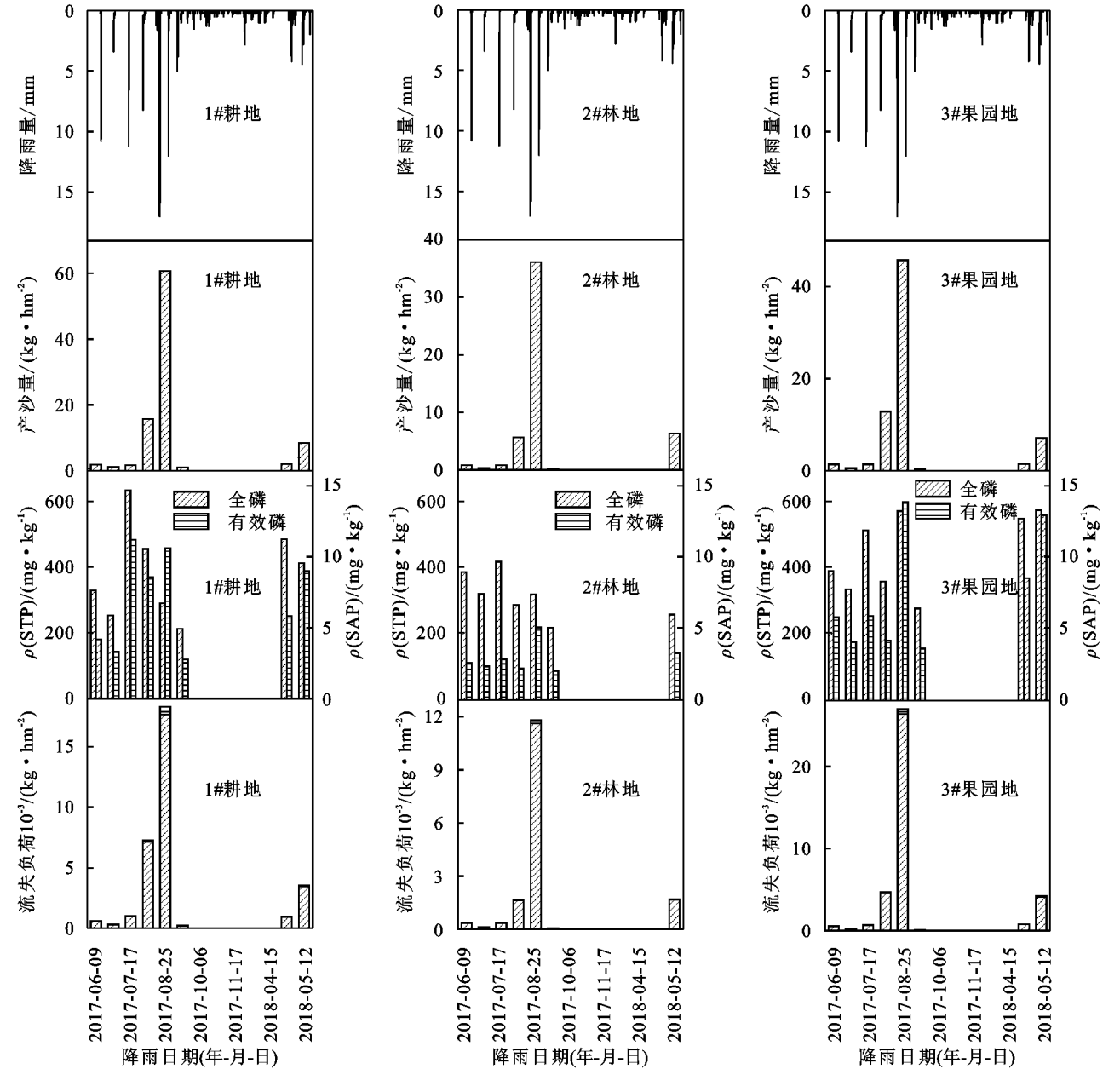


图3 侵蚀泥沙中磷素浓度及流失负荷流失过程

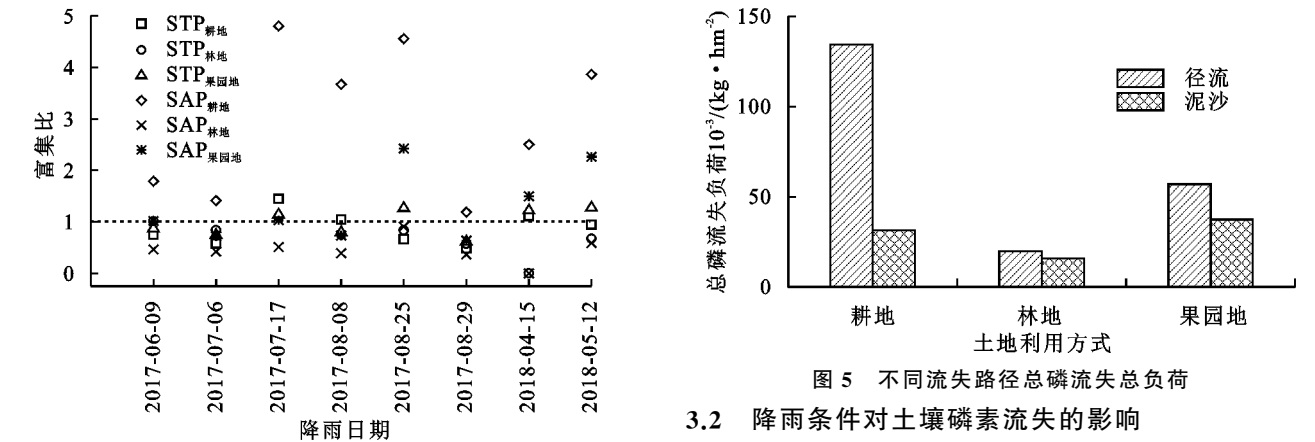


图4 侵蚀泥沙中全磷和有效磷富集比

图5 不同流失路径总磷流失总负荷

3.2 降雨条件对土壤磷素流失的影响

降雨是诱发坡面土壤磷素流失的主要动力,随着

降雨强度增大,雨水和径流对坡面土壤的侵蚀和冲刷作用增强,土壤中磷素伴随坡面水土流失过程流失^[24]。将降雨特征与径流及泥沙中各形态磷素浓度作冗余分析(图 6),降雨特征对耕地、林地和果园地径流中磷素浓度变化的解释量分别为 62.2%,60.7%和 54.8%,其中第 1 排序轴的解释量最大,降雨强度与径流中磷素浓度夹角小且长度最长,表明降雨强度与径流中磷素浓度关系最密切呈正相关关系($P < 0.01$),对径流中磷素浓度变化起决定性作用,前人^[16]研究结果也显示,径流中磷素浓度随雨强增加而增加。前期降雨条件是影响土壤磷素流失的重要因素^[8,12],本研究用相邻 2 场降雨事件的间隔天数来表示前期降雨条件对磷素流失的影响,当间隔天数较短时,前期降雨使得土壤水分含量增加,相同降雨条件下坡面产流时间缩短,更多雨水转变为坡面径流,侵蚀冲刷力增强,磷素流失增加;间隔天数较长时,土壤前期经历较长干燥期,干燥条件下土壤微生物磷大量释放,土壤复湿后进入水中使得径流中 $\rho(\text{TDP})$ 增加^[3],故解释了本研究雨季初期 2018 月 4 月 15 日降雨事件中径流磷素流失以 TDP 为主的原因。

降雨特征对耕地、林地和果园地泥沙中磷素浓度变

化的解释量分别为 48.0%,41.1%和 71.7%,可见仅降雨特征难以解释耕地和林地泥沙中磷素浓度变化,耕地和林地泥沙中磷素浓度随降雨强度的增加呈现波动性变化,相较于降雨强度,果园地泥沙磷素浓度与降雨量的关系更为密切。这与前人^[16]研究得出的泥沙中磷素浓度随降雨强度增加而增加的结论不同,究其原因前人^[25]试验方法多为室内人工模拟降雨,而自然降雨条件下土壤磷素流失过程复杂,除了要考虑降雨这个外在动力条件外,同时应考虑母体土壤自身性质对磷素流失的影响,有待深究。此外,土壤侵蚀是一个选择性侵蚀过程,富含磷素的细小颗粒优先被径流输出,泥沙中磷素相对富集^[24]。有学者^[16]对岩溶区坡耕地磷素流失研究指出,泥沙 STP 存在富集现象,且富集程度与雨强无关。本研究发现,泥沙 STP 和 SAP 均存在富集现象,不同降雨事件中泥沙 ER_{STP} 值均接近 1,这说明泥沙 ER_{STP} 与雨强无明显相关关系,相较于泥沙 ER_{STP} ,泥沙 ER_{SAP} 随雨强波动变化大。有研究^[26]指出,泥沙 SAP 与土壤可蚀性显著相关,降雨条件的改变会引起土壤性质如土壤水分、土壤质地和有机质含量的改变,进而改变土壤有效磷的解吸释放过程,雨强对泥沙 ER_{SAP} 的作用机制有待进一步研究证实。

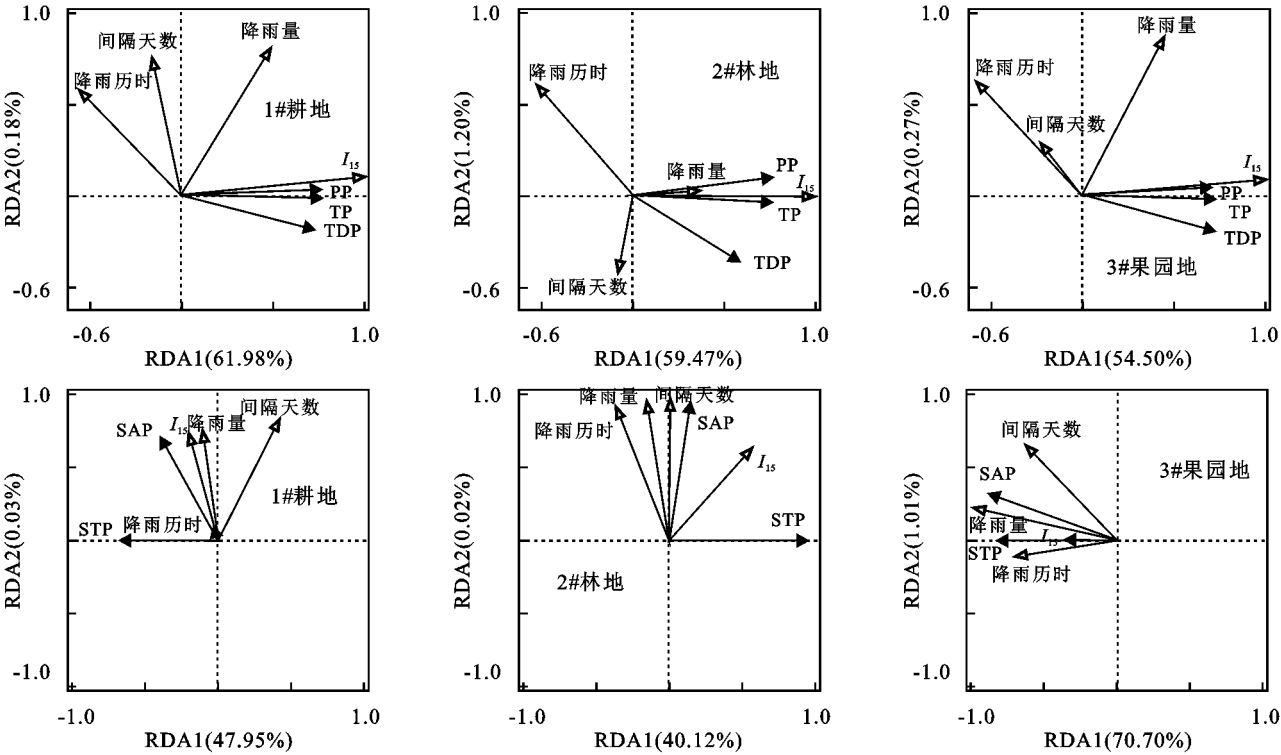


图 6 径流和泥沙中磷素浓度与降雨特征 RDA 分析

3.3 土地利用方式对土壤磷素流失的影响

不同土地利用方式因土壤状况、植被覆盖、耕作施肥等管理实践的差异导致土壤磷素流失的差异^[27]。本研究发现,不同土地利用方式坡面径流中磷素流失浓度及流失负荷由大到小整体表现为耕地>果园地>林地,岩溶槽谷区 3 个径流小区土壤均为嘉陵江组灰

岩发育而来的石灰土,土壤 pH 为 7.89~8.07,偏碱性,土壤有机质在不同土地利用方式之间差异显著。土壤有机质增加可降低土壤磷素的吸附能力,有机酸对磷吸附位点的堵塞以及与土壤中可交换铁、铝的络合是造成磷素迁移的潜在原因^[4]。也有研究^[18]发现,岩溶区土壤磷素主要受土壤有机质含量的控制,

本研究中耕地以种植蔬菜为主,菜地有机质积累较多,有机质含量为 52.68 g/kg,耕作破坏土壤团聚体结构,加速土壤有机质的矿化,使得封存于内部的磷素释放出来,水溶性磷浓度增加^[13]。更为关键的是种植蔬菜施肥量大,磷肥施入土壤后植物吸收利用有限,大部分则被固定积累在土壤中成为流失源,受降雨侵蚀后随径流和泥沙向外迁移,加上耕地植被覆盖率低,对与细小颗粒结合的磷素拦截作用微弱,故耕地坡面径流中磷素流失浓度最高。

有研究^[27]指出,不同土地利用方式泥沙和径流中磷素流失表现相同,而本研究发现,不同土地利用方式泥沙中磷素流失浓度及流失负荷由大到小整体表现为果园地>耕地>林地,与径流中磷素流失规律有一定的差异性。对于耕地泥沙中磷素浓度低于果园地,尤其是泥沙有效磷浓度低于果园地,这可能与果园地土壤具有较高水平的单酯磷以及高活性碱性磷酸酶有关^[28]。单酯磷是土壤有机磷的重要组分,易被碱性磷酸酶水解成不稳定的正磷酸盐,故果园地泥沙有效磷浓度最高。有学者^[29]发现,耕地转变为果园地过程中,土壤侵蚀减少,但有效磷的损失反而增加,也进一步支持了本研究。相较于耕地和果园地,林地植被覆盖率最高,乔灌木构成了稳定的复合缓冲层和地表覆盖层,在控制土壤磷素流失方面效果较好。

4 结论

(1)坡面土壤磷素流失强烈依赖于坡面产流产沙过程,槽谷区土壤磷素流失以径流流失为主,泥沙流失为辅,2 条流失路径磷素负荷比在耕地、林地和果园地中分别为 4.64、1.25 和 2.06,控制坡面产流过程是防治磷素流失的关键。

(2)整个观测期不同土地利用方式径流中磷素流失浓度及流失负荷由大到小整体表现为耕地>果园地>林地,而在泥沙中磷素流失浓度及流失负荷由大到小整体表现为果园地>耕地>林地。总体来看,不同土地利用方式 TP 流失总负荷表现为耕地>果园地>林地,耕地 TP 流失总负荷为 0.17 kg/hm²,约是果园地的 1.76 倍和林地的 4.68 倍。

(3)径流中磷素浓度变化受降雨强度控制,雨季初期径流中磷素流失形态以 TDP 为主,其余降雨事件则以 PP 为主, $\rho(\text{PP})/\rho(\text{TP})$ 的比例为 63.92%~96.97%。

(4)侵蚀泥沙中磷素浓度变化受降雨强度影响较小,泥沙磷素存在富集现象, ER_{STP} 为 0.57~1.45, ER_{SAP} 为 0.37~4.80, ER_{STP} 与雨强无明显相关关系。

参考文献:

[1] Zhou W, Guo Z, Chen J, et al. Direct seeding for rice production increased soil erosion and phosphorus runoff losses in subtropical China[J]. *Science of The Total En-*

vironment, 2019, 695: 133845.

[2] Reid K, Schneider K, McConkey B. Components of phosphorus loss from agricultural landscapes, and how to incorporate them into risk assessment tools [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2018, 6(135): 1-15.

[3] Heathwaite A L, Dils R M. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways [J]. *Science of The Total Environment*, 2000, 251/252: 523-538.

[4] Von Wandruszka R. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility [J]. *Geochemical Transactions*, 2006, 7(1): 6-13.

[5] Alloush G A, Boyer D G, Belesky D P, et al. Phosphorus mobility in a karst landscape under pasture grazing system [J]. *Agronomie*, 2003, 23(7): 593-600.

[6] Jarvie H P, Sharpley A N, Brahana V, et al. Phosphorus retention and remobilization along hydrological pathways in karst terrain [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(9): 4860-4868.

[7] Penn C J, Mullins G L, Zelazny L W. Mineralogy in relation to phosphorus sorption and dissolved phosphorus losses in runoff [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5): 1532-1540.

[8] Ziadat F, Taimeh A. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment [J]. *Land Degradation and Development*, 2013, 24(6): 582-590.

[9] Liu K, Elliott J A, Lobb D A, et al. Critical factors affecting field-scale losses of nitrogen and phosphorus in spring snowmelt runoff in the Canadian prairies [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(2): 484-496.

[10] Mohamadi M A, Kaviani A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.

[11] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 920-926.

[12] Truman C C, Potter T L, Nuti R C, et al. Antecedent water content effects on runoff and sediment yields from two Coastal Plain Ultisols [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1189-1196.

[13] Berhe A A, Barnes R T, Six J, et al. Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: Carbon, nitrogen, and phosphorus [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2018, 46(1): 521-548.

[14] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-round nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particle [J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5): 676-684.

[15] Muukkonen P, Hartikainen H, Alakukku L. Effect of soil structure disturbance on erosion and phosphorus losses from Finnish clay soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(1): 84-91.

- [16] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J].土壤学报,2019,56(5):1072-1084.
- [17] Yan Z J, Chen S, Li J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J].Journal of Environmental Management,2016,181:26-35.
- [18] 张倩,韩贵琳,柳满,等.贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J].生态学杂志,2019,38(2):15-22.
- [19] 彭梦玲,吴磊,乔闪闪.不同雨强下黄土裸坡水—沙—氮磷流失耦合模拟[J].中国环境科学,2018,38(3):1109-1116.
- [20] 左继超,郑海金,奚同行,等.自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J].环境科学,2017,38(10):4178-4186.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [22] Udawatta R P, Motavalli P P, Garrett H E. Phosphorus loss and runoff characteristics in three adjacent agricultural watersheds with claypansoils [J]. Journal of Environmental Quality,2004,33(5):1709-1719.
- [23] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000(4):188-193.
- [24] Yang L X, Yang G S, Li H P, et al. Effects of rainfall intensities on sediment loss and phosphorus enrichment ratio from typical land use type in Taihu Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27:12866-12873.
- [25] Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. Effects of soil erosion and land use on spatial distribution of soil total phosphorus in a small watershed on the Loess Plateau, China[J].Soil and Tillage Research,2018,184:142-152.
- [26] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J].Journal of Hydrology,2014,514:180-191.
- [27] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):12-17.
- [28] Zhou B, Vogt R D, Lu X Q, et al. Land use as an explanatory factor for potential phosphorus loss risk, assessed by P indices and their governing parameters[J]. Environmental Science Processes and Impacts,2015,17(8):1443-1454.
- [29] Chen Z J, Wang L, Weu A S, et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment[J].Science of The Total Environment,2019,648:1097-1104.

(上接第264页)

- [14] 湖北省统计局.湖北统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2018.
- [15] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J].Soil and Tillage Research,2007,94(1):133-141.
- [16] 张君,易军,刘目兴,等.不同水耕年限稻田土壤水分渗漏与保持特征[J].水土保持学报,2016,30(6):90-95.
- [17] 杨燕,易军,刘目兴,等.不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):257-263.
- [18] 张君,刘目兴,易军,等.不同植稻年限土壤剖面基本性质与水—氮分布的关系[J].土壤,2019,51(6):1188-1194.
- [19] 陈若礼,訾秀华.耕层土壤水分含量与小麦出苗和生长发育的关系[J].安徽农业科学,1999,27(2):150-151.
- [20] 马洪斌,李晓欣,胡春胜.中国地下水硝态氮污染现状研究[J].土壤通报,2012,43(6):258-262.
- [21] 陈效民,吴华山,孙静红.太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J].环境科学,2006,27(6):1217-1222.
- [22] 吕璞.江汉平原小麦不同氮肥运筹模式研究[D].武汉:长江大学,2017.
- [23] 于振文.作物栽培学各论[M].北京:中国农业出版社,2003:32-33.
- [24] 王亚萍,胡正华,张雪松,等.土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响[J].江苏农业科学,2016,44(11):67-71.
- [25] 孙存华,白嵩,白宝璋,等.水分胁迫对小麦幼苗根系生长和生理状态的影响[J].吉林农业大学学报,2003,25(5):485-489.
- [26] 李彩霞,周新国,王和州,等.小麦花后淹水胁迫对根区土温及籽粒灌浆的影响[J].麦类作物学报,2013,33(6):1232-1236.
- [27] Araki H, Hamada A, Hossain M A, et al. Water logging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling[J].Field Crops Research,2012,137(20):27-36.
- [28] 武文明,李金才,陈洪俭,等.氮肥运筹方式对孕穗期受渍冬小麦穗部结实特性与产量的影响[J].作物学报,2011,37(10):1888-1896.
- [29] 向永玲,方正武,赵记伍,等.灌浆期涝渍害对弱筋小麦籽粒产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2020,40(6):730-736.
- [30] 王小燕,高春保,卢碧林,等.江汉平原小麦开花前降水分布特点及同期渍害的产量效应[J].长江流域资源与环境,2013,22(12):1642-1642.
- [31] 陈恢富,王小燕,高春保,等.不同种植密度对江汉平原地区小麦产量的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2014,11(17):4-7.
- [32] 翟振,李玉义,逢焕成,等.黄淮海北部农田犁底层现状及其特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2322-2332.