

孟良崮小流域径流与磷素传输动态关系

杨彩玲¹, 胡砚霞¹, 于兴修¹, 姚佳吟¹, 郑若琳¹, 刘前进²

(1. 湖北大学资源环境学院区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 武汉 430062;

2. 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276000)

摘要: [目的] 为探讨不同降雨类型下径流-磷素流失滞后关系特征。[方法] 以北方土石山区孟良崮小流域为研究对象, 利用 2010—2012 年的 32 场降雨实测数据, 通过 C-Q (浓度-流量) 环路和 Pearson 相关分析方法进行分析。[结果] 1) 暴雨条件下, 土壤饱和后释放大磷素使磷素浓度峰值晚于径流峰值; 大雨条件下, 溶解性磷素从近源释放, 颗粒态磷素从远源迁移到径流中; 中雨条件下, DIP (溶解性无机磷)、PP (颗粒性磷) 和 TP (总磷) 输移主要受地表径流影响, DP (溶解性总磷) 输移受到土壤和沉积物影响; 小雨条件下, 表现出较快的溶解态磷素输移和较慢的颗粒态磷素输移。2) 磷素输移的 C-Q 环路在径流过程中呈现多种类型, 其中, PP 和 TP 多为顺时针滞后, 占 18%~23%, 主要受地表径流的强烈冲刷; 逆时针滞后在各组分磷素中出现的比例相近, 为 12%~18%, 源于土壤磷素缓慢释放和河道沉积物再悬浮; DP 流失多表现为正“8”字形滞后, 占比 16%; DIP 流失表现为逆“8”字形滞后, 占比 19%; 线形滞后出现的频次较少; 复杂形滞后的比例为 31%~45%。3) 暴雨和大雨条件下, DIP 和 DP 与径流(Q)呈弱相关或负相关, 源于强烈径流快速冲刷地表, 而溶解性磷被土壤吸附未能同步释放或被径流稀释; 中雨时, 适中的径流冲刷力增强溶解性磷的释放; 小雨时, 径流主要迁移附着在松散土壤颗粒上的颗粒性磷。在不同降雨类型下, PP 和 TP 始终高度相关, 表明 TP 的主要来源是 PP。[结论] 孟良崮小流域需要针对不同的降雨情况防范磷素流失。

关键词: 北方土石山区; 径流-磷素关系; C-Q 环路; Pearson 相关分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0046-10

Analysis of the Dynamic Relationship between Runoff and Phosphorus Transport in the Menglianggu Small Watershed

YANG Cailing¹, HU Yanxia¹, YU Xingxiu¹, YAO Jiayin¹, ZHENG Ruolin¹, LIU Qianjin²

(1. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, College of

Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. School of Resources and

Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the characteristics of runoff-phosphorus loss hysteresis relationship under different rainfall types. [Methods] This study focused on the Menglianggu small watershed in the rocky mountainous area of northern China. Using data from 32 rainfall events recorded between 2010 and 2012, C-Q (concentration-discharge) loops and Pearson correlation analysis were applied. [Results] 1) During torrential rain, a large amount of phosphorus was released after soil saturation, causing the phosphorus concentration peak to lag behind the runoff peak. In the case of heavy rain, dissolved phosphorus was released from nearby sources, while particulate phosphorus was transported from distant sources to the runoff. During moderate rain, the transport of DIP (dissolved inorganic phosphorus), PP (particulate phosphorus), and TP (total phosphorus) was mainly influenced by surface runoff, whereas DP (dissolved phosphorus) was affected by soil and sediment. Light rain showed rapid transport of DP and slower transport of PP. 2) The C-Q loops

收稿日期: 2024-07-08

修回日期: 2024-09-25

录用日期: 2024-10-16

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-25

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42377329)

第一作者: 杨彩玲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土资源利用与生态效应研究。E-mail: 1808907379@qq.com

通信作者: 刘前进(1979—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: Liuqj_79@163.com

of phosphorus transfer exhibited various patterns during the runoff process. PP and TP often showed a clockwise lag, accounting for 18%—23%, mainly due to the strong scouring of surface runoff. The counterclockwise lag appeared in 12%—18% of the phosphorus components, resulting from the slow release of soil phosphorus and the resuspension of riverbed sediments. Dissolved phosphorus loss mainly exhibited a figure-eight positive loop, accounting for 16%, while DIP loss showed a figure-eight negative loop, accounting for 19%. Linear lags were less frequent, and complex lags ranged between 31% and 45%. 3) Under torrential and heavy rain conditions, DIP and DP had weak or negative correlations with runoff (Q), attributed to the rapid surface scouring, which caused PP to be more easily lost, while DP was adsorbed by the soil or diluted by the runoff. Under moderate rain, the appropriate runoff scouring force enhanced the releases of DP. In light rain, runoff primarily transported PP attached to loose soil particles. Particulate phosphorus and total phosphorus were consistently highly correlated across different rainfall types, indicating that TP mainly originated from PP. [Conclusion] The Menglianggu watershed needs to be protected against phosphorus loss for different rainfall conditions.

Keywords: Northern soil and rocky mountains; runoff-phosphorus relationship; C-Q loop; pearson correlation analysis

Received: 2024-07-08

Revised: 2024-09-25

Accepted: 2024-10-16

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

磷是自然界和农业生态系统中的关键营养元素,对维持生物生产力和生态平衡至关重要,也是主要的非点源污染物质^[1]。然而,在农业流域中,由于气候变化引起的极端降雨事件增多^[2],导致小流域地表径流和土壤侵蚀加剧,磷素流失的过程可能因降雨模式的变化而发生显著变化,使磷过量流失,导致水体富营养化,引起藻华暴发和水质恶化,严重威胁到水生生物多样性和农业发展。因此,深入探索和理解农业流域的降雨径流与磷素流失的动态过程,对于理解农田非点源污染发生机理、制定有效的水资源管理策略至关重要。

目前,磷素流失动态过程的研究多是利用模拟降雨或天然降雨分析揭示地形地貌、覆被类型、降雨强度、土地利用类型、土壤理化性质等对磷素流失的影响^[3-4]。范晓娟等^[5]研究坡地磷素流失机制模拟中发现,坡面径流和壤中流中的总磷浓度及流失量随着降雨强度的增大而增大;张梦等^[6]分析在不同雨强下黄土坡面土壤侵蚀和养分流失特征时表明,雨强越大,坡面径流总磷流失量增加 2.3~3.9 倍。尽管上述研究已经揭示径流与磷素流失的基本动态过程及影响因素,但精确量化降雨事件中径流和磷素流失时间响应的研究较少。C-Q 环路分析是一种用于研究水体中污染物浓度与流量间关系的方法^[7],可精确地量化不同流量条件下污染物浓度的变化。MARTTILA 等^[8]利用连续监测和 C-Q 环路研究芬兰泥炭地森林径流的侵蚀和悬浮沉积物输移动态过程发现,夏季径流峰值是控制年沉积物产量的主要因素;LI 等^[9]采用冗余分析和分层划分相结合的方法,定量分析溶解无机碳和有机碳的 C-Q 迟滞模式及驱动因素。此

外,BENDER 等^[10]利用连续监测和 C-Q 环路分析法研究南巴西亚热带农村集水区暴雨事件中磷素流失的时间动态格局,取得良好的结果。

为此,以孟良崮小流域为例,通过对 2010—2012 年 32 场降雨的实测数据进行分析,利用 C-Q 环路探究径流-磷素流失过程的动态关系,利用滞后指数(HI),精确量化磷素流失的时间滞后特征;通过 Pearson 相关分析,进一步研究不同降雨条件下各形态磷素流失与径流量的相关关系,以此深入理解磷素流失过程的机理,为水资源管理和预防水体富营养化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区孟良崮流域(118°15'E, 35°20'N)位于沂蒙山区沂河上游,是中国北方典型的土石山区,总面积 1.03 km²,流域内地势东北高、西南低,海拔从西南部的 174 m 逐渐升高到东北部的 485 m(图 1)。流域内的土地利用以农业为主,包括耕地和果园等,施肥活动可能增加地表径流中的磷负载。该区属于暖温带大陆性季风气候,年平均降水量为 757 mm,降水量分布不均,降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 60%以上,多以暴雨形式出现,对流域内的径流-磷素流失动态过程具有重要影响,是研究径流-磷素流失时间响应特征的理想单元。

1.2 数据来源

本研究所需数据由山东省水土保持与环境保育重点实验室实测并提供,包括 2010—2012 年的全部 32 次降雨事件。在流域出口处设置的三角堰和广口

堰测量径流,每 5 min 采集 1 次水样。根据径流率在降雨过程中的变化^[11],将次降雨的径流过程分为初期(0~30 min)、中期(30~70 min)和末期(70~135 min)3 个阶段。从采集的水样中抽取上层清水,然后在 120 °C 的烘箱中烘干至恒重,以测定沉积物。磷素包括溶解性无机磷(DIP)、溶解性总磷(DP)、颗粒性磷(PP)和总磷(TP)。径流中不同形式的磷素采用分光光度法测定,其中,PP=TP-DP。

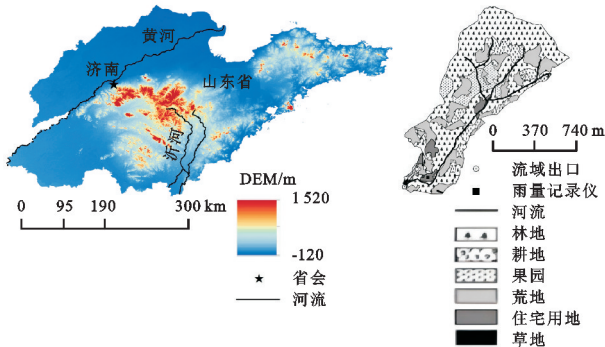


图 1 研究区位置

Fig.1 Study area location map

根据气象部门采用的标准(表 1)^[12]来划分降雨类型,将监测到的 32 场降雨(2010 年 10 场,2011 年 14 场,2012 年 8 场)划分为暴雨(Ⅳ)、大雨(Ⅲ)、中雨(Ⅱ)和小雨(Ⅰ)等 4 种类型(表 2)。

表 1 降雨类型划分标准

划分标准	小雨	中雨	大雨	暴雨
12 h 内降雨量	<5	5~14.9	15~29.9	≥30
24 h 内降雨量	<10	10~14.9	25~49.9	≥50

表 2 孟良崮小流域 2010—2012 年 32 场降雨类型划分
Table 2 Classification of 32 rainfall events in the Menglianggu Small Watershed from 2010 to 2012

年份	降雨类型	场次数量	降雨量/mm	降雨时间/min
2010	Ⅰ类	1	4.8	360
	Ⅱ类	2	6.7~16.5	150~720
	Ⅲ类	3	17.7~22.9	192~660
	Ⅳ类	4	52.1~105.5	192~2 880
2011	Ⅰ类	1	3.5	40
	Ⅱ类	4	5.9~12.7	72~240
	Ⅲ类	7	15.2~49.5	102~940
	Ⅳ类	4	46.2~71.0	90~774
2012	Ⅰ类	1	0.2	95
	Ⅱ类	1	11.0	120
	Ⅲ类	1	27.7	260
	Ⅳ类	3	47.5~57.3	90~380

为深入分析磷素径流流失的动态变化过程,从 2012 年 4 种降雨类型中各选 1 场有代表性的降雨类型进行研究。降雨Ⅰ:1 a 中降雨量最少的降雨(8 月 13 日);降雨Ⅱ:1 a 中第 1 场有效中雨(8 月 26 日);降雨Ⅲ:1 a 中降

雨持续时间最长的降雨(8 月 3 日);降雨Ⅳ:1 a 中降雨量最大的第 1 场降雨(7 月 30 日)。

1.3 研究方法

1.3.1 C-Q 环路分析法 C-Q(浓度-流量)环路分析法可用于分析磷素等溶解态或颗粒态物质的输移特性。通过 C-Q 环路分析,可识别出在不同降雨条件下径流和磷素浓度的变化趋势,从而更好地理解磷素在径流中的动态行为及其潜在来源。C-Q 环路的类型一般包括顺时针、逆时针、正“8”字形、逆“8”字形和线形等^[13]。顺时针环路表示磷素质量分数早于径流达到峰值,主要是由于物源物质增多引起;逆时针环路表示径流早于磷素质量分数达到峰值,即河道磷素输移速率降低,磷素浓度峰值出现滞后现象;正“8”字形环路的特点为径流量较低时为顺时针曲线,而径流量较高时为逆时针;逆“8”字形环路的特征与正“8”字形环路正好相反;线形环路代表径流和磷素浓度的输移时间和变化比例同步^[14]。

1.3.2 量化磷素滞后模式 滞后指数(HI)是用来描述径流过程中污染物浓度与流量关系的指标,反映污染物的传输机制及污染源的时空分布特征^[15]。为得到一个不受流量绝对值(Q)和污染物浓度(C)影响的滞后指数,将 2 个指标归一化处理为:

$$Q_n(i) = \frac{1}{Q_{\max}} \times Q(i) \quad (1)$$

$$PC_n(i) = \frac{1}{PC_{\max}} \times PC(i) \quad (2)$$

式中: Q_{\max} 分别为某一事件的最大流量, m^3/s ; PC_{\max} 最大磷素浓度, mg/L ; $Q_n(i)$ 和 $PC_n(i)$ 分别为 i 时刻的归一化流量和磷素浓度。

在对数据进行归一化处理之后,通过绘制 1 条从 Q_{\max} 开始到最后一个磷素样本结束的直线,将滞后环分割为水线的上升和下降分支。与直线成直角,分别计算上升边缘(D_{rise})和下降边缘(D_{fall})的最大距离。最后,得到滞后指数,记为 HI,被定义为 D_{rise} 和 D_{fall} 的总和^[16]。该指标的优点为:1)用 1 个数字来表达迟滞的大小和方向;2)是无量纲的;3)数据简单直观;4)由于进行归一化处理,指标值允许在事件间和采样点间进行直接比较;5)滞后环开始时的高 PC(如第 1 次冲刷)在其他指标中可能被忽略,此方法将其考虑在内;6)由于可分别分析上升翼和下降翼的磷素浓度动态变化,因此,关于上升翼和下降翼的附加信息可增强对滞后模式的解释^[17]。

1.3.3 Pearson 相关分析法 Pearson 相关系数是一种定量衡量变量间相关性的指标,其值为(-1,1)。该系数反映 2 个变量间线性关系的强度和方向,其中,-1 表示完全的负相关,1 表示完全的正相关。计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 X 和 Y 各自的样本平均值; x_i 、 y_i 分别为 2 个样本的变量值。Pearson 相关系数 r 的绝对值越大,表示因变量与自变量的相关程度越高。

1.3.4 数据处理与分析 本文采用 Excel 2021 软件进行相关数据统计和计算,利用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同降雨类型下磷素输出特征

通过对不同降雨类型下径流与磷素浓度关系进行分析,揭示暴雨、大雨、中雨和小雨条件下各组分磷素的变化趋势。由图 2 可知,在暴雨条件下,径流量在初期迅速上升,大约在 40 min 达到峰值后逐渐下降,对磷素浓度产生显著影响。DIP 浓度随着时间推移逐渐增加,过程相对平缓,而 DP 的浓度在径流量增大时上升,在峰值后逐渐下降。相比之下,PP 的浓度在暴雨条件下呈现出更大的波动,早期迅速上升,并且通常在径流量峰值后出现较高浓度,随后波动下降。TP 的变化趋势主要受 PP 影响,早期迅速上升,峰值后呈波动下降。同时,TP 的变化还受 DP 的影响,因而变化较为复杂。

在大雨条件下,径流量 70 min 出现 1 个小峰值,后期流量增大,在 95 min 时出现最大峰值,持续一段时间后流量迅速下降。在第 1 个峰值期间,DIP 的浓度随径流量的增加而减少,第 2 个峰值期间浓度先上升后下降;而 DP 的浓度在整个过程中相对稳定,与 DIP 相比变化较小;PP 在径流峰值处浓度显著增加;TP 的浓度变化趋势与 PP 类似。

在中雨条件下,径流量随时间逐渐增加,峰值出现在降雨 70 min。DIP、DP、PP 和 TP 浓度在径流峰值前波动较小,峰值过后磷素浓度波动变大,磷素浓度流失整体偏小。PP 和 TP 在径流峰值前出现 2 个异常值,可能是由于不均匀的降雨分布、不同地质类型和肥料施用不均匀等原因,造成积累的磷素在径流增大时被冲刷,形成异常值。

在小雨条件下,径流形成 3 个峰值。在前 30 min,径流量迅速上升,形成第 1 个峰值,DIP、DP、PP 和 TP 在此阶段也迅速上升。在 30~70 min,径流量先迅速上升,随后略微下降,形成第 2 个峰值,在这个阶段,DIP 和 DP 的浓度变化较平缓,PP 和 TP 的浓度则随着径流量的增加而明显上升。在 70~120 min 时,径流量再次上升,形成第 3 个峰值,在此阶段,4 种组分磷素的浓度也再次上升,除 DP 变化幅度较小外,DIP、PP、TP 均出现较大的浓度波动。

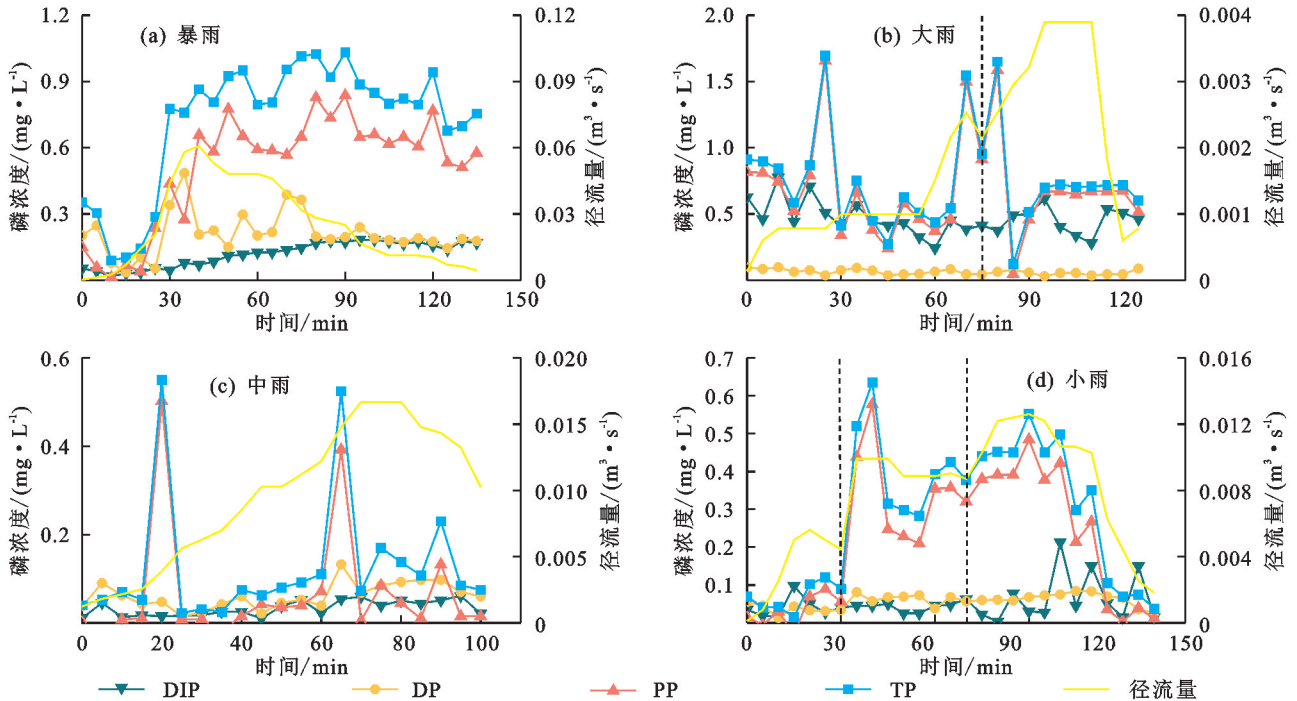


图 2 不同降雨事件径流与磷素浓度动态

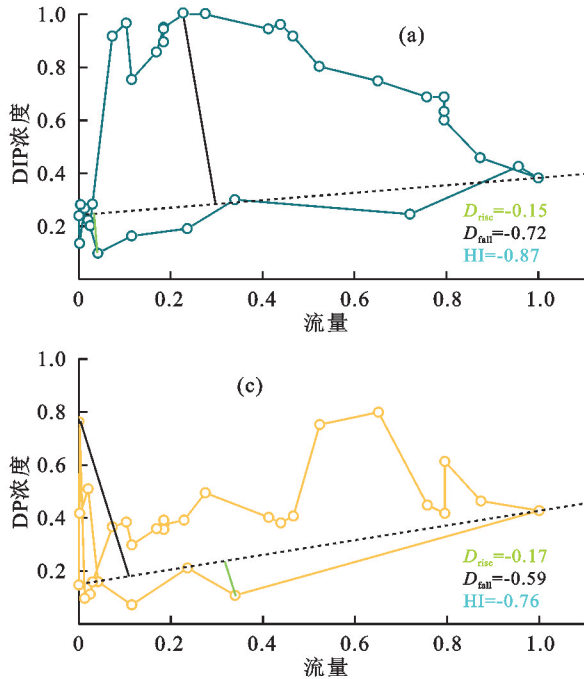
Fig.2 Dynamics of runoff and phosphorus concentration for different rainfall events

2.2 不同降雨类型下的径流-磷素环路特性

2.2.1 不同降雨类型下各组分磷素的滞后环特性分析 通过对不同降雨类型下各组分磷素的滞后环

进行分析发现,其环路特征各不相同。在暴雨条件下,4 种组分磷素的滞后环表现出逆时针的形态,对应的滞后指数(HI)均为负值(图 3)。意味着在暴雨

40 min 内,随着径流增加,磷素浓度也开始上升,然而,在 40 min 以后径流量不再增加而开始减少时,磷素浓度仍然持续上升直达到峰值。意味着在暴雨过程中,磷素浓度的积累和释放存在明显的滞后效



应,即径流量先达到峰值,磷素浓度的峰值出现略晚。 D_{rise} 的绝对值小于 D_{fall} 的绝对值,表明在暴雨条件下,磷素浓度上升阶段的变化速率明显小于下降阶段的变化速率。

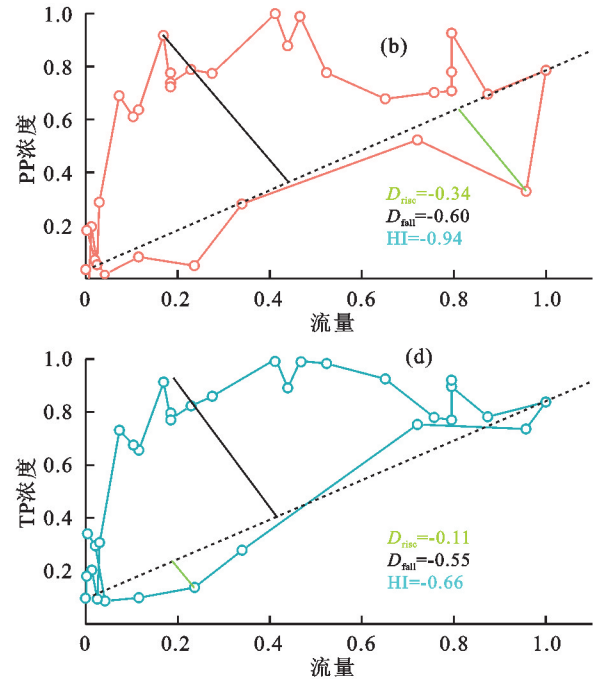


图 3 暴雨下的径流-磷素的 C-Q 环路

Fig.3 Runoff-phosphorus C-Q loop under torrential rainfall

在大雨条件下,径流有 2 个峰值,分别对其进行分析(图 4)显示,第 1 个径流峰值出现在降雨 75 min 以内,径流-磷素关系通常呈线性趋势,表明在地表径流逐渐汇集时,磷素浓度与流量呈正相关,不存在明显的滞后现象。然而,在降雨 75 min 以后,第 2 个径流峰值期间,随着径流量的进一步增加,出现明显滞后现象。DIP 和 DP 的滞后指数为正值,说明其浓度峰值早于流量峰值,呈顺时针环路特征;相反,PP 和 TP 滞后指数为负数,呈逆时针环路,且环路特征相似,意味着 PP 和 TP 的浓度峰值滞后于流量峰值,并且表明在大雨条件下,PP 对 TP 的输移影响最大。

在中雨条件下,DIP、PP 和 TP 的滞后指数均为正值(图 5),由此可知,组分磷素浓度峰值出现在径流峰值之前,环路为顺时针滞后。此现象表明在降雨 70 min 前,径流开始增加时,磷素浓度也迅速上升,并在径流达到峰值之前就达到其自身的浓度峰值。其中,PP 和 TP 的滞后环形态相似,表明在中雨条件下,TP 主要是以 PP 流失为主,相反,DP 的滞后指数为负值,表现为逆时针滞后,表明其浓度峰值在降雨 70 min 后出现。

在小雨条件下,观察到 4 种组分磷素的滞后环表现见图 6。将径流分为 3 个峰值分析,第 1 个峰值期间,DIP 和 DP 的滞后指数为正值,呈顺时针滞后,而 PP 和 TP 的滞后指数为负值,呈逆时针滞后,说明在

降雨 30 min 内,DIP 和 DP 先达到浓度峰值;在降雨 30~70 min 内,第 2 个峰值期间,4 种磷素组分滞后指数均为正数,表明此阶段磷素的浓度峰值都早于径流峰值,磷素的释放和输移较快;而在第 3 个径流峰值时,DIP、DP 和 TP 滞后指数为负数,PP 滞后指数为正值,并且 PP 和 TP 的滞后指数绝对值小于 DP 的滞后指数绝对值,表明在降雨 70 min 以后,DP 的浓度波动较大。而 DIP 的滞后指数绝对值在整个小雨条件下变化不大,表明其浓度波动较为稳定。

2.2.2 各组分磷素滞后环路比例分析 为进一步探讨各组分磷素的滞后模式,本研究分析 2010—2012 年 32 场降雨的径流-磷素滞后环路比例(表 3)。在孟良崮流域中,顺时针滞后在 PP 和 TP 上较为常见,比例分别为 23%和 18%,而在 DIP 和 DP 上出现的比例较低,仅为 6%;逆时针滞后在 4 种磷素组分上的比例较为接近,通常在 12%~18%;DP 流失多表现为正“8”字形滞后,比例为 16%;逆“8”字形滞后主要发生在 DIP 上,比例为 19%,PP 和 TP 的“8”字形滞后发生比例较低;线形滞后在 DIP 和 DP 上的发生比例相同,均为 19%,而在 PP 和 TP 上的比例较低,为 14%;复杂形滞后在 4 种磷素组分中占比最高,约为 31%~45%,通常是由于降雨不均匀导致的径流多峰现象,增加滞后环的复杂性。

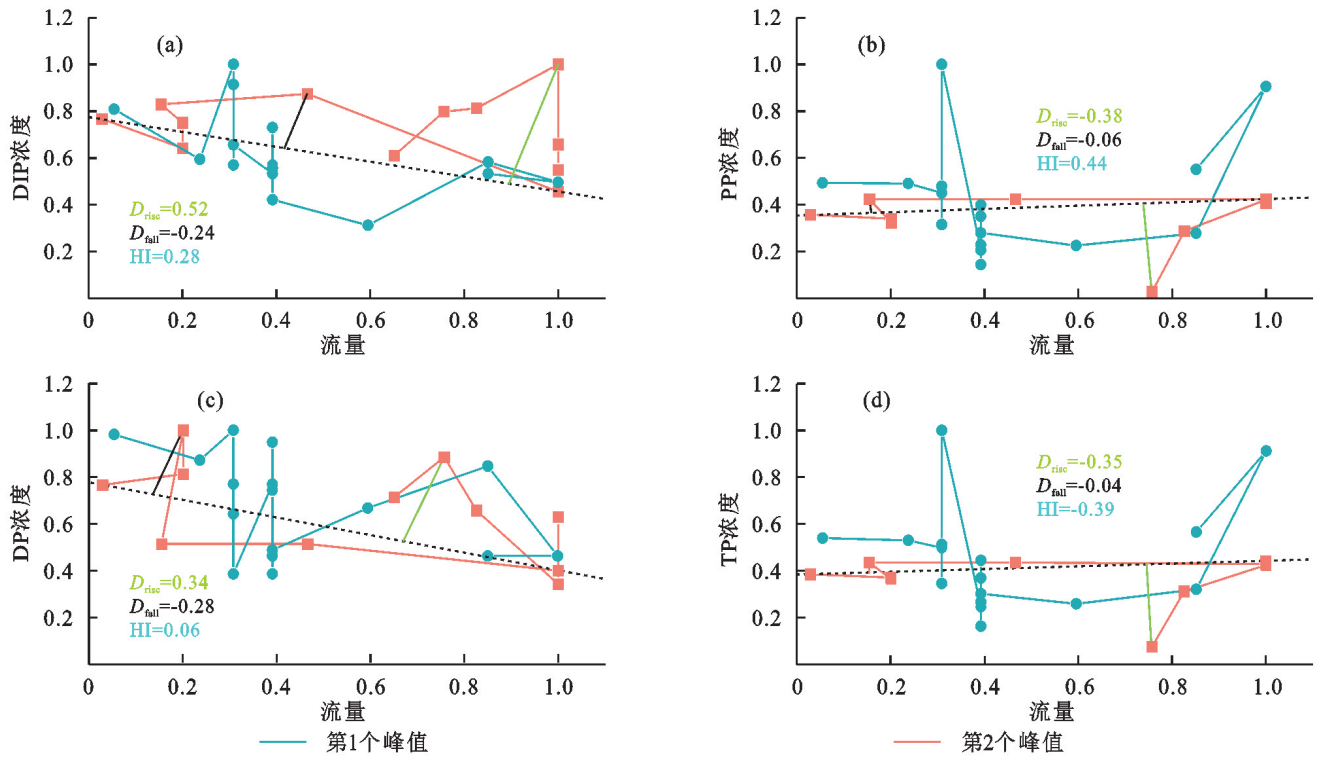


图 4 大雨下的径流-磷素的 C-Q 环路

Fig.4 Runoff-phosphorus C-Q loop under heavy rainfall

2.3 不同降雨条件下径流与各组分磷素相关性分析

为进一步研究不同降雨条件下各形态磷素流失与径流量的关系,本文采用 Pearson 相关分析方法分析表明,在不同降雨条件下,径流与各形态磷素间的相关性存在显著差异(图 7)。在暴雨条件下,Q 与 DP 和 TP 间呈显著正相关,与 DIP 则表现出负相关;

在大雨条件下,Q 与 DIP 和 DP 呈负相关,与 PP 和 TP 的相关性不显著;中雨条件下,Q 与 4 种形态磷素均呈正相关,并且与 DIP 和 DP 相关性显著;小雨条件下,Q 与 DP、PP 和 TP 之间为显著正相关,而与 DIP 之间的相关性较弱。值得注意的是,PP 和 TP 在任何降雨条件下均表现为显著正相关。

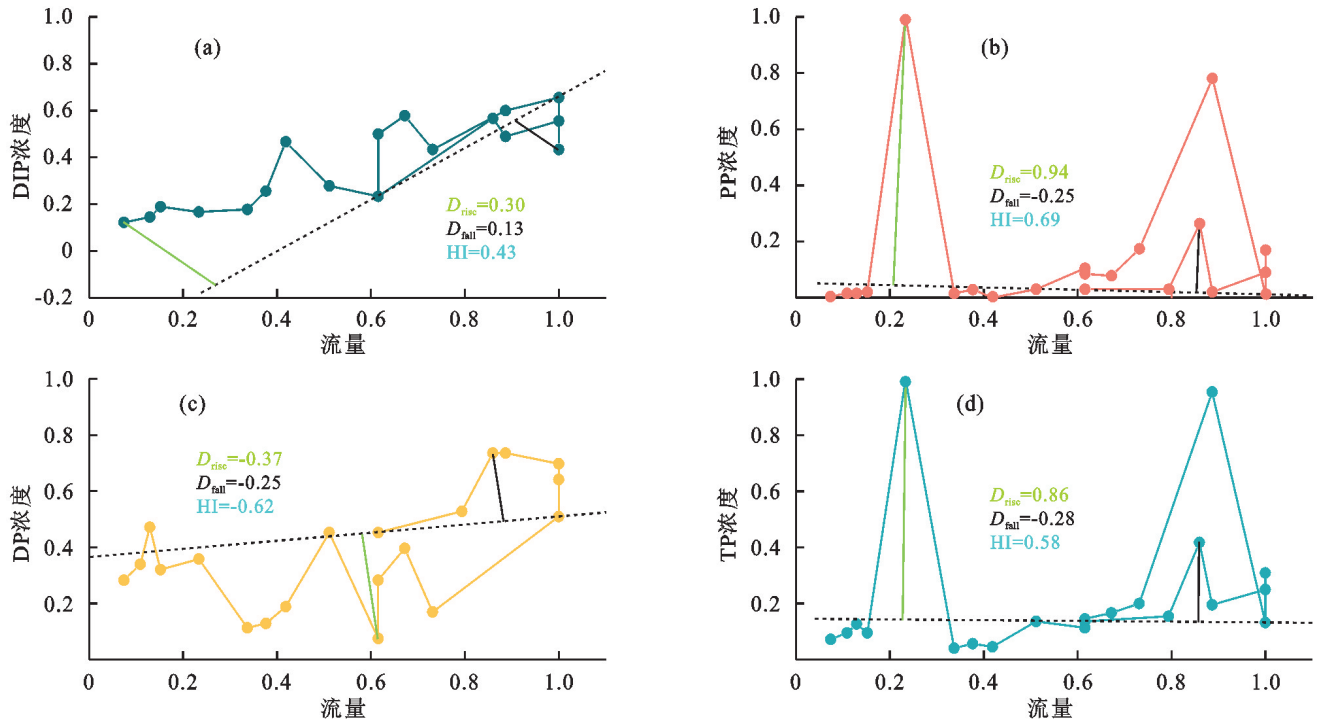


图 5 中雨下的径流-磷素的 C-Q 环路

Fig.5 Runoff-phosphorus C-Q loop under moderate rainfall

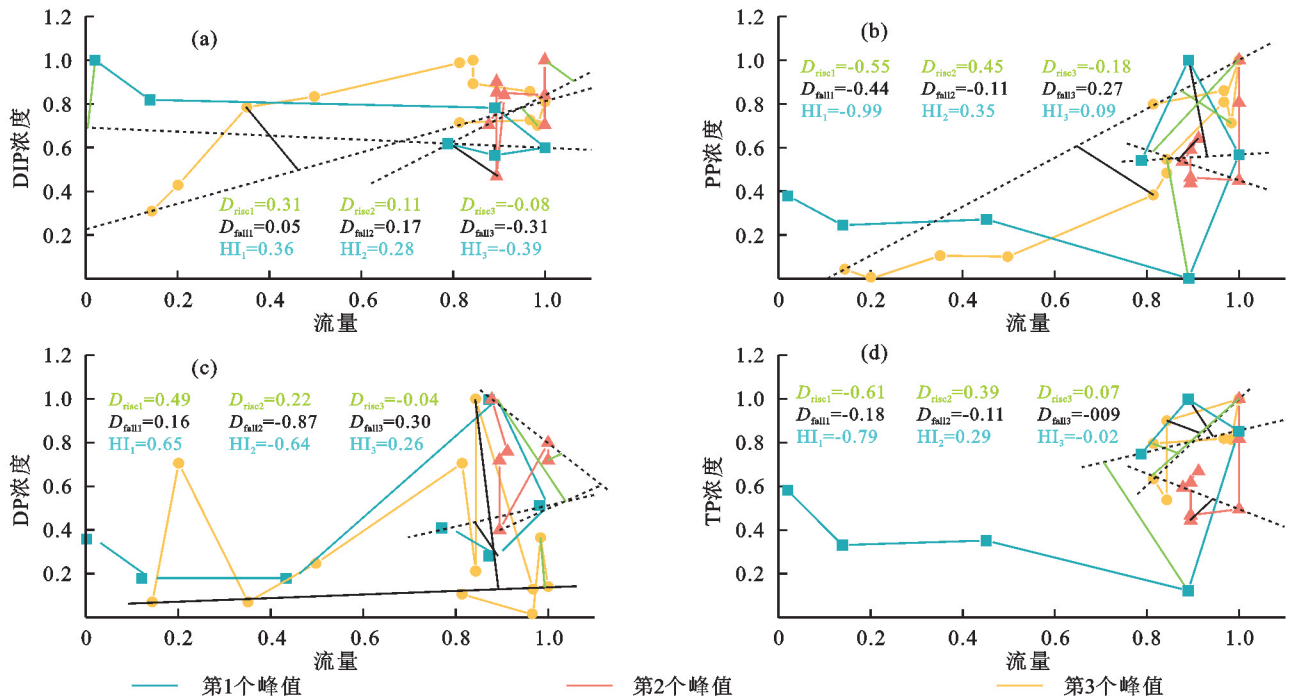


图 6 小雨下的径流-磷素的 C-Q 环路

Fig.6 Runoff-phosphorus C-Q loop under light rainfall

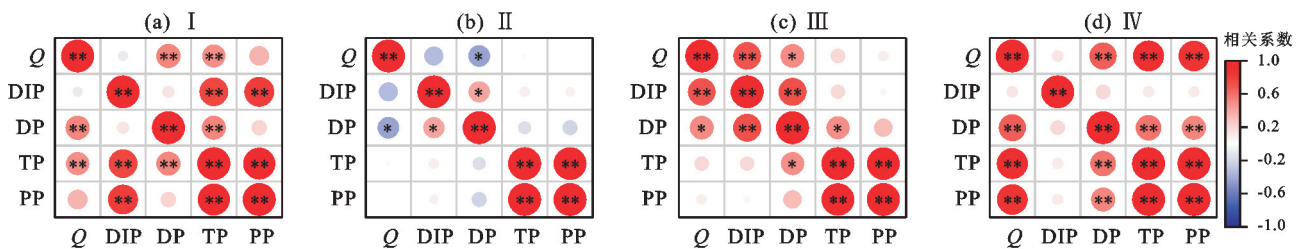
3 讨论

利用北方土石山区典型小流域 2010—2012 年 32 场自然降雨的实测数据,研究不同降雨条件下径流-磷素流失过程的关系表明,在暴雨和大雨期间,地表径流的强烈冲刷作用显著影响着磷素的释放和输移,尤其是颗粒态磷流失量较大,与陈玲等^[18]研究结果相一致;中雨和小雨条件下,溶解态磷的输移相对稳定,与前人研究^[19]结果基本一致。

表 3 研究区各磷素环路形式所占比例

Table 3 Percentage of different phosphorus loop types in the study area

磷素	%					
	顺时针	逆时针	正“8”字形	逆“8”字形	线形	复杂形
DIP	6	16	9	19	19	31
DP	6	12	16	6	19	41
PP	23	14	0	4	14	45
TP	18	18	9	5	14	36



注: * 表示 $p \leq 0.05$; ** 表示 $p \leq 0.01$ 。

图 7 不同降雨下径流-磷素的相关系数矩阵

Fig.7 Matrix of correlation coefficients for runoff and phosphorus under different rainfall conditions

径流-磷素的 C-Q 环路分析显示,不同降雨类型下,各组分磷素的滞后环特性显著不同。滞后环在水文过程中呈多种类型,包括顺时针、逆时针、逆“8”字形、正“8”字形、线形和复杂形,此滞后环不仅反映降雨和径流的动态变化,还揭示磷素流失的生态过程和源头特性。

在暴雨条件下,各组分磷素滞后环呈现逆时针形态,其上升翼小于下降翼。表明在暴雨的前 40 min 内,土壤尚未饱和,具有较强的磷素吸附能力,因此,部分降雨径流携带的磷素被土壤吸附,导致径流中

磷素浓度上升较慢。在 40 min 之后,随着土壤逐渐趋向饱和,其吸附能力下降,更多的磷素从土壤中释放出来,进入径流中,从而导致磷素浓度峰值出现在径流峰值之后。在孟良崮小流域,土壤和植被覆盖较为稀薄,暴雨条件下,土壤较快达到饱和状态,与 CHERAGHI 等^[20]研究结果相一致,在土壤和植被覆盖较为薄弱的区域,污染物浓度在后期升高,主要是由于土壤吸附饱和后快速释放污染物所致,而在土层较厚的地区,此滞后效应有所减弱。

大雨条件下径流量有 2 个峰值。在降雨前 75

min 期间,径流出现第 1 个峰值,径流-磷素关系表现为线性趋势,磷素浓度与流量呈正相关,大雨条件下径流量稳步增加,磷素从地表和表层土壤中平缓释放,形成稳定的输移过程,此时磷素主要来自于地表的快速流失,与周怡雯等^[21]研究结果相一致,养分的流失主要受降雨引发的地表径流的影响,而径流基本随雨强的增大而增加。在降雨 75 min 之后,第 2 个峰值期间,DIP 和 DP 的浓度峰值早于流量峰值,而 PP 和 TP 的浓度峰值滞后于流量峰值,出现明显滞后现象,说明溶解态磷素更容易从近源释放并进入径流,而颗粒态磷素则可能通过较长的侵蚀路径从远源迁移到径流中。夏绍钦等^[22]研究也表明,不同沉积物浓度变化与其来源和迁移路径有关。

中雨条件下 DIP、PP 和 TP 的滞后环呈顺时针形态,其浓度峰值早于径流峰值,表明在降雨 70 min 内,地表径流的冲刷作用迅速将磷素从地表和沉积物中释放出来,形成早期的磷素浓度峰值。PP 和 TP 的滞后环相似,表明 PP 是 TP 的主要组成部分,且其输移过程主要受地表径流的控制,CAO 等^[23]研究发现,降雨带来的泥沙流失,与地表径流呈现顺时针滞后现象,而 PP 通常吸附在泥沙上,与本研究结果一致。相比之下,DP 的滞后环为逆时针,浓度峰值滞后于径流峰值,与陈曦等^[24]研究结果有所差异,可能是因为在在中雨条件下,本研究区的 DP 释放主要依赖于土壤中的慢速解吸过程,在径流下降阶段仍持续释放。表明在中雨条件下,DIP、PP 和 TP 的输移主要受地表径流的影响,而 DP 的输移更多受到土壤和沉积物的影响。

在小雨条件下,径流出现 3 个峰值。第 1 个径流峰值期间,DIP 和 DP 的滞后环为顺时针,说明初期径流主要带来溶解态磷素,且其增加速度较快,PP 和 TP 的滞后环为逆时针,表明磷素在降雨 30 min 内释放速度较慢,可能因为小雨径流的冲刷力较弱,未能立即将沉积物中的磷素释放。在降雨 30~70 min 出现第 2 个径流峰值,期间各组分磷素均呈顺时针滞后,反映此阶段径流量的增加增强地表的冲刷作用,使得磷素迅速增加并进入径流,此阶段的滞后效应与 JIANG 等^[25]的研究结果一致,进一步验证地表径流对“冲刷机制”和磷素输移的影响规律。第 3 个峰值时,PP 和 TP 的滞后指数较小,说明在降雨 70 min 以后,土壤中的颗粒态磷素的储量已接近耗尽,释放速率明显减缓。在整个降雨过程中,PP 和 TP 由于增加速度降低,滞后指数变小;而 DIP 的滞后指数始终较小,说明 DIP 在小雨事件中浓度波动较为稳定;DP 峰值由先于径流峰值变为晚于径流峰值。王宏等^[26]研究发现,花椒沟小流域持续的降雨、干湿交替等过程导致部分 PP 通过胶体磷的形式转化为 DP,与本研究中 PP 和 DP 的滞后指数变化相一致,说明

在小雨后期部分 DP 来源是 PP。

对 32 场降雨事件的 C-Q 滞后环分析显示,顺时针滞后在 PP 和 TP 中出现的比例最高,约为 18%~23%,表明地表径流的强烈冲刷作用是初期颗粒态磷和总磷流失的主要驱动力;逆时针滞后在各组分磷素中出现的比例接近,约为 12%~18%,反映磷素释放具有显著的时间滞后性,即便径流量开始下降,磷素浓度仍然可能上升,鞠娟娟等^[27]研究发现,此现象与土壤中磷素的缓慢释放或河道沉积物在降雨后期的再悬浮有关;DP 流失常表现为正“8”字形滞后,比例为 16%,说明在低径流条件下,溶解态磷素的流失速率较快,而在高径流时,流失速率减缓;逆“8”字形滞后最常见于 DIP,比例为 19%,反映溶解态无机磷在低径流时滞后释放,而在高径流时则提前释放的过程,与 DP 相反;线形滞后出现的频次较少,约为 14%,反映在某些条件下,磷素浓度与径流量间存在简单的线性关系;复杂形滞后的比例为 31%~45%,通常是源于降雨的不均匀性,导致径流出现多峰现象,从而增加滞后环的复杂性。因此,可通过按径流峰值划分来研究其滞后环,有助于更好地理解其形成机制。

在暴雨和大雨条件下,PP 和 TP 与 Q 呈正相关,DIP 和 DP 与 Q 的相关性较弱或呈负相关。宁嘉丽等^[28]研究指出,由于暴雨和大雨期间强烈的地表径流快速冲刷表层土壤,使得颗粒态污染物更容易随径流流失。而本研究中溶解性磷(如 DIP 和 DP)由于土壤的吸附作用,未能与径流同步释放,反而可能滞留在土壤或通过吸附沉降,此外,高强度的径流可能稀释溶解性磷的浓度,导致其与径流量间的负相关性。在中雨条件下,径流与溶解性磷相关性更强,可能是因为此时径流的冲刷力相对适中,足以释放土壤中的溶解性磷但又不导致其过度稀释或滞留。而在小雨条件下,径流与 PP 的相关性更为显著,可能是由于径流的冲刷能力有限,只能迁移一些松散的、较轻的土壤颗粒,颗粒物往往附着着磷素,特别是 PP。缪杰杰等^[29]研究表明,在大雨和暴雨条件下,更容易发生土壤侵蚀和养分流失,中小雨条件下影响较小。本文的结果与其不同,原因可能是研究区域的植被和耕作措施不同,导致对降雨事件的响应差异。在所有降雨条件下,PP 和 TP 间始终保持较强的正相关性,表明 TP 的主要来源是 PP,且二者在输移过程中的行为模式高度一致。

本研究可为水资源管理提供科学依据。未来应根据不同条件下磷素流失的滞后效应,制定相应的水土保持和环境管理措施,以改善流域生态环境,实现水资源的可持续利用。

4 结论

1)不同降雨类型下,磷素的输移特性存在明显差

异。在暴雨条件下,各组分磷素的滞后环为逆时针,磷素峰值晚于径流峰值,主要是由于土壤饱和后释放大 量磷素。大雨条件下磷素前期流失受地表径流影响, 输移过程稳定,后期溶解性磷素从近源释放,颗粒态磷 素从远源迁移到径流中。中雨条件下,DIP、PP 和 TP 的输移主要受地表径流的影响,而 DP 的输移更多受 到土壤和沉积物的影响。小雨条件下,径流出现 3 个 峰值,第 1 个径流峰值期间,溶解态磷释放较快,颗粒 态磷输移较慢;第 2 个峰值时,各组分磷素均呈顺时 针滞后,磷素流失受到地表径流冲刷的影响;第 3 个 峰值时,土壤中的颗粒态磷素的储量已接近耗尽,PP 和 TP 释放速率明显减缓,DP 带来新的远源磷素。 在整个小雨过程中,DIP 的浓度波动较为稳定。

2)磷素输移的 C-Q 滞后环在径流过程中呈多种 类型,包括顺时针、逆时针、逆“8”字形、顺“8”字形、线 形和复杂形。其中,PP 和 TP 流失主要表现为顺时 针滞后,表明地表径流的强烈冲刷是颗粒态磷和总磷 流失的主要驱动力;逆时针滞后在各组分磷素中出现 的比例相近,显示磷素释放存在显著的时间滞后性, 可能源于土壤中磷素的缓慢释放或降雨后期河道沉 积物的再悬浮;DP 流失多表现为正“8”字形滞后,表 明低径流条件下溶解态磷素流失速率加快,高径流时 则减缓;DIP 流失形式主要为逆“8”字形滞后,体现出 低径流时释放滞后,高径流时提前释放的特征;线形 滞后出现频次较少;而复杂形滞后出现的比例为 31%~45%,通常是由于降雨不均匀导致径流多峰现 象,使滞后环的复杂形增加。

3)在暴雨和大雨条件下,DIP 和 DP 与 Q 相关性 较弱或呈负相关,可能因为强烈的地表径流快速冲刷 土壤,导致 PP 更容易流失,而溶解性磷被土壤吸附, 未能同步释放或被径流稀释;在中雨条件下,径流与 溶解性磷相关性较强,因其冲刷力适中,能够释放土 壤中的溶解性磷但不过度稀释;在小雨条件下,径流 主要迁移附着在松散土壤颗粒上的 PP,因此,与 PP 的相关性更显著。无论降雨类型如何,PP 和 TP 间 始终保持强正相关性,表明 TP 主要来源于 PP,且二 者的行为模式一致。

参考文献:

- [1] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等.三峡库区典型小流域氮磷 流失特征[J].环境科学学报,2007,27(2):326-331.
XU Q G, LIU H L, SHEN Z Y, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2007,27(2):326-331.
- [2] 郑明国,蔡强国,陈浩.黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺 度水沙关系的影响[J].生态学报,2007,27(9):3572-3581.
ZHENG M G, CAI Q G, CHEN H. Effect of vegeta- tion on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in gullied-hilly area of the Loess Plateau, China[J].Acta Ecologica Sinica,2007,27(9):3572-3581.
- [3] ZHU M M, YU X X, LI Z W, et al. Quantifying and interpreting the hysteresis patterns of monthly sediment concentration and water discharge in karst watersheds [J].Journal of Hydrology,2023,618:e129179.
- [4] 廖敏,叶照金,黄宇,等.长兴县合溪水库集雨区苗木地 不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响[J].生态学 报,2017,37(21):7342-7350.
LIAO M, YE Z J, HUANG Y, et al. Influence of dif- ferent fertilization management modes on phosphorus loss in run-off from nursery land in the catchment area of Hexi Reservoir in Changxing County[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7342-7350.
- [5] 范晓娟,张丽萍,邓龙洲,等.我国东南典型侵蚀区坡地 磷素流失机制模拟研究[J].环境科学学报,2018,38(6): 2409-2417.
FAN X J, ZHANG L P, DENG L Z, et al. Study on the mechanism of slope phosphorus loss in the typical erosion area in southeast China[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(6):2409-2417.
- [6] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及 氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):85-90.
ZHANG M, LI D J, ZHOU Y. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion, nitrogen and potassium loss on loess slope[J].Journal of Soil and Water Conser- vation,2018,32(1):85-90.
- [7] MISSET C, RECKING A, LEGOUT C, et al. An attempt to link suspended load hysteresis patterns and sediment sources configuration in alpine catchments [J].Journal of Hydrology,2019,576:72-84.
- [8] MARTTILA H, KLØVE B. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forest- ry[J].Journal of Hydrology,2010,388(3/4):414-425.
- [9] LI X, WANG J, LIN J, et al. Hysteresis analysis reveals dissolved carbon concentration-discharge relationships dur- ing and between storm events [J].Water Research, 2022, 226:e119220.
- [10] BENDER M A, DOS SANTOS D R, TIECHER T, et al. Phosphorus dynamics during storm events in a subtropical rural catchment in southern Brazil [J].Agriculture, Ecosys- tems and Environment,2018,261:93-102.
- [11] 马骞,于兴修,刘前进.横坡耕作径流溶解态氮磷流失特 征及其富营养化风险:以鲁中南山地丘陵区为例[J].农 业环境科学学报,2011,30(3):492-499.
MA Q, YU X X, LIU Q J. Characteristics of dissolved N, P loss and eutrophication risk in runoff water in con- tour tillage: A case study of hilly and mountainous area in south-central of Shandong Province, China[J].Journal of Agro-Environment Science,2011,30(3):492-499.
- [12] 李瑞玲,张永春,刘庄,等.太湖缓坡丘陵地区雨强对农 业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J].环境科学,

- 2010,31(5):1220-1226.
- LI R L, ZHANG Y C, LIU Z, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu Lake basin [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 1220-1226.
- [13] FORTESA J, LATRON J, GARCÍA-COMENDADOR J, et al. Runoff and soil moisture as driving factors in suspended sediment transport of a small mid-mountain Mediterranean Catchment [J]. *Geomorphology*, 2020, 368: e107349.
- [14] 甘贤民, 严友进, 戴全厚, 等. 降雨强度和坡度对喀斯特坡耕地产流和氮磷流失的影响[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(4): 116-123.
- GAN X M, YAN Y J, DAI Q H, et al. Impact of rainfall intensity and slope gradient on runoff and nitrogen and phosphorus loss fluxes of sloping farmland in a Karst area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(4): 116-123.
- [15] LLOYD C E M, FREER J E, JOHNES P J, et al. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 388-404.
- [16] AICH V, ZIMMERMANN A, ELSENBEEER H. Quantification and interpretation of suspended-sediment discharge hysteresis patterns: How much data do we need? [J]. *Catena*, 2014, 122: 120-129.
- [17] LLOYD C E M, FREER J E, JOHNES P J, et al. Discharge and nutrient uncertainty: Implications for nutrient flux estimation in small streams [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(1): 135-152.
- [18] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2151-2158.
- CHEN L, LIU D F, SONG L X, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow-brown under different rainfall intensities [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2151-2158.
- [19] 张林, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 792-799.
- ZHANG L, HUANG Z L, XIAO W F, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus output in runoff and rainfall runoff in lanlingxi watershed, Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 792-799.
- [20] CHERAGHI M, JOMAA S, SANDER G C, et al. Hysteretic sediment fluxes in rainfall-driven soil erosion: particle size effects [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8613-8629.
- [21] 周怡雯, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 49-54.
- ZHOU Y W, DAIC T, LIU Y J, et al. Effects of cultivation measures and rainfall intensities on the slope erosion in red soil sloping cropland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 49-54.
- [22] 夏绍钦, 张会兰, 郝佳欣, 等. 长江涪江小河坝站水沙关系特性及其驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1603-1613.
- XIA S Q, ZHANG H L, HAO J X, et al. Characteristics of runoff-sediment rating curves and corresponding driving factors at xiaoheba station on fu river, Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1603-1613.
- [23] CAO L, LIU S, WANG S J, et al. Factors controlling discharge-suspended sediment hysteresis in karst basins, Southwest China: Implications for sediment management [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: e125792.
- [24] 陈曦, 王雪松, 贺京哲, 等. 模拟降雨条件下秦岭南麓土壤磷素流失特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 80-87.
- CHEN X, WANG X S, HE J Z, et al. Experimental study on soil phosphorus loss of northern area of Qinling Mountains under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 80-87.
- [25] JIANG R, WOLI K P, KURAMOCHI K, et al. Coupled control of land use and topography on nitrate-nitrogen dynamics in three adjacent watersheds [J]. *Catena*, 2012, 97: 1-11.
- [26] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(10): 4547-4554.
- WANG H, XU Y L, ZHANG Q, et al. Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed in Tuojiang River basin [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4547-4554.
- [27] 鞠娟娟, 刘华, 程晨, 等. 渤海埕岛海域再悬浮沉积物对磷吸附作用试验研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(2): 154-160.
- JU J J, LIU H, CHENG C, et al. Experimental study on phosphorus adsorption by resuspended sediment in Chengdao area of Bohai Sea [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(2): 154-160.
- [28] 宁嘉丽, 黄艳荟, 李桂芳, 等. 自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 293-302.
- NING J L, HUANG Y H, LI G F, et al. Characteristics of soil erosion and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 293-302.
- [29] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 86-93.
- MIAO J J, LIU Y F, HU H X, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy fields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 86-93.