

DOI: 10.5846/stxb201308252150

徐亚娟,高扬,朱宁华,朱波,陈维梁,于贵瑞.紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷.生态学报,2014,34(17):5021-5029.
Xu Y J, Gao Y, Zhu N H, Zhu B, Chen W L, Yu G R. The dynamic process of carbon and phosphorus losses by runoff and associated loss load in a farmland-dominated watershed of purple soil region. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 5021-5029.

紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出 过程及其流失负荷

徐亚娟^{1,2}, 高 扬^{2,*}, 朱宁华¹, 朱 波³, 陈维梁⁴, 于贵瑞²

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002)

摘要:通过对位于川中丘陵区的紫色土流域在次降雨过程中溶解态有机碳(DOC)和不同形态磷素的输出进行动态监测,分析降雨过程DOC和P输出负荷,并探讨降雨径流对C、P迁移和水环境的影响。研究表明:(1)3次降雨共产生地表径流20399.8 m³,碳、磷输出负荷为83.19 kg和5.1 kg,次降雨过程径流C、P输出动态差异较大,其中径流DOC浓度随降雨历时的延长而降低,随后迅速升高,在达峰值后逐渐降低并趋于平稳。(2)降雨径流过程中磷素迁移主要以颗粒态(PP)为主,磷酸盐(PO₄³⁻-P)是径流溶解态总磷(DTP)的主要存在形式,3次降雨PP输出负荷分别为1167.491、1891.331、984.74 g;PO₄³⁻-P输出负荷分别为108.37、338.8、167.79 g。(3)3次降雨径流DOC输出浓度分别为3.37、4.77、6.97 mg/L,总磷(Total phosphorus, TP)输出浓度分别为0.11、0.43、0.74 mg/L;次降雨径流C/P比分别为192、48和42.1,相比于暴雨而言,大雨和中雨带来的水质问题需引起关注。

关键词:紫色土; 流域; 碳、磷; 迁移; C/P

The dynamic process of carbon and phosphorus losses by runoff and associated loss load in a farmland-dominated watershed of purple soil region

XU Yajuan^{1,2}, GAO Yang^{2,*}, ZHU Ninghua¹, ZHU Bo³, CHEN Weiliang⁴, YU Guirui²

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China

4 College of Life Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Rain has been identified as a major factor causing phosphorus (P) and dissolved organic carbon (DOC) loss, particularly in agricultural landscape. More application of chemical fertilizer and unreasonable agricultural management intensified the loss. In addition, rain also made great contribution to water pollution, such as eutrophication which degraded the surface water quality and threatened the hydrosphere ecosystem. The aim of this study was to monitor the dynamics of carbon and phosphorus losses under different rainfall events in Yanting, Sichuan Province, China (105°27' E, 31°16' N) from July to August in 2012, then to better understand the processes and mechanisms of the dissolve organic carbon (DOC) and P loss, and to evaluated the effect of environment on purple soil area as well. The results showed that the total discharge of all of the rainfall events was 20399.8 m³ and the transport load of carbon and P was 83.19 kg and 5.1 kg, respectively. The higher rainfall resulted in the bigger loss load. Furthermore, the DOC and total phosphorus (TP) output dynamics were

基金项目:国家自然科学基金(31200404);中国科学院兼维优秀青年人才项目(2012RC202);中国科学院成都山地所山地表生过程与生态调控重点实验室开放基金(Y2R20050DD)

收稿日期:2013-08-25; 网络出版日期:2014-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyang@igsnrr.ac.cn

significantly different among the three types of rainfall. For example, the pattern of DOC concentration in the runoff is not consistent with the discharge of runoff, which showed that the concentration went down with the time length of rainfall first, and then sharply up, after it achieved the peak value, it decreased gradually and then tended to remain at a level. The order of peak values of total phosphorus (TP) appeared in the runoff was 20th Jul > 20th Aug > 30th Aug. The particular phosphorus (PP) transported by surface flow in all kinds of rainfall types was the main form of P during runoff, while phosphate phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) occupied the main position of dissolved total phosphorus (DTP). The transport load of PP under each rainfall event was 1167.491, 1891.331, 984.74 g while that of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was 108.37, 338.8, 167.79 g, respectively. The export concentration of DOC and TP in runoff under different rainfall events was 3.37, 4.77, 6.97 mg/L and 0.11, 0.43, 0.74 mg/L, respectively. One of the targets to evaluate the effectiveness of P is C/P ratio. In general the lower C/P ratio will lead to the higher effectiveness of P. In each rainfall events the ratio was 192, 48 and 42.1, respectively, which indicated that the chance of water pollution caused by big and middle rainfall types was much higher. In conclusion, the effective control measures should be taken to reduce the loss of P and carbon in this pluvial region, and more attentions should be given to big and middle rainfall types.

Key Words: purple soil; watershed; carbon; phosphorus; transport; C/P

C、N、P 是自然界不可或缺的生命元素,不合理的农业耕作方式及大量化肥的施用使得营养元素流失严重并威胁水质健康。农业地区非点源污染问题已引起人们的普遍关注,大量研究集中于 N、P,并在流域坡地尺度上进行野外观测、模型模拟及污染控制研究,探讨不同坡度、不同土地利用及施肥状况对土壤氮、磷迁移的影响^[1-3]。罗专溪^[4]在紫色土丘陵区的研究结果显示,该区近 40% 的总氮(TN)、总磷(TP)与颗粒态悬浮物(SS)污染负荷由占总径流量 30% 的初期降雨径流所运移。蒋锐等在该区的研究称暴雨径流初期冲刷形成的土壤侵蚀是暴雨初期径流磷素的迁移机制^[5]。土壤磷的迁移受控于多种因素,相关研究表明溶解性有机碳(DOC)对土壤 C、N、P 的迁移、转化起着重要的载体作用^[6],DOC 可使吸附于土壤胶体上的磷酸盐活化迁移,提高土壤磷的有效性的同时也加大了磷素迁移对水质的威胁。另外,ECN^[7]的研究表明降雨是土壤 DOC 迁移的主要影响因素。高全洲在北江流域的研究表明有机碳的迁移以颗粒态为主^[8];而姜伟在乌裕尔河流域的研究表明有机碳主要以溶解态在水中长距离迁移^[9]。目前国内关于 DOC 迁移的研究主要集中在江河,但对以流域为单元的 DOC 迁移特征的研究较少。

紫色土由于其发育缓慢,是典型的幼龄土,土层浅薄,有机质含量低,加之流域内降雨集中,60% 以上集中于夏季并多以暴雨形式出现,使得其水土流

失严重^[10-11],每年流失表土可达 3.77 亿 t,由水土流失而造成的土壤养分流失数量巨大,由此带来的水环境问题也日益显著。因此监测降雨径流碳、磷动态过程及其对水环境的影响对紫色土区流域水生态系统具有重要意义。本文选取四川盐亭紫色土小流域为研究对象,意在阐明自然降雨条件下,流域尺度内土壤 C、P 输出动态并探讨降雨径流过程土壤养分流失机理及其环境评价,为更好的理解暴雨径流土壤养分的迁移机制及有效控制农业非点源污染提供科学依据。

1 研究方法

1.1 试验区域

研究流域位于四川盆地中北部的盐亭紫色土试验站(105°27' E, 31°16' N),处于川中丘陵区北部深丘区域,嘉陵江一级支流涪江支流——弥江、湍江分水岭上(图 1)。属于中亚热带湿润季风气候,年均温度 17.3 °C,最高气温 40 °C,最低气温 -5.1 °C,无霜期 194 d;多年平均降雨量 826 mm,分布不均,春季占 5.9%,夏季占 65.5%,秋季占 19.7%,冬季占 8.9%,降雨集中于夏季并且多暴雨。该流域为典型的紫色土丘陵区农林复合生态系统流域,其土地利用模式及小流域农业结构极具代表性,流域土地总面积 34.64 hm²,其中林地 12.14 hm²,旱地 15.64 hm²,两季田 2.39 hm²,居民地 1.71 hm²,其他用地 1.22 hm²(图 1)。季施氮肥(碳酸氢铵)以 N 计 130

kg/hm²、磷肥(过磷酸钙)以 P₂O₅ 计 90 kg/hm²、钾肥(氯化钾)以 K₂O 计 36 kg/hm²。供试土壤为石灰性紫色土,质地为中壤,其主要理化性质如下:容重(1.3±0.03) g/cm³、pH 值 8.1±0.2、全磷(0.81±0.3) g/kg、速效磷(44.72±5.91) mg/kg、速效氮(102.64±2.22) mg/kg、有机质(7.8±0.7) g/kg、含水率(16.6±1.0)%。

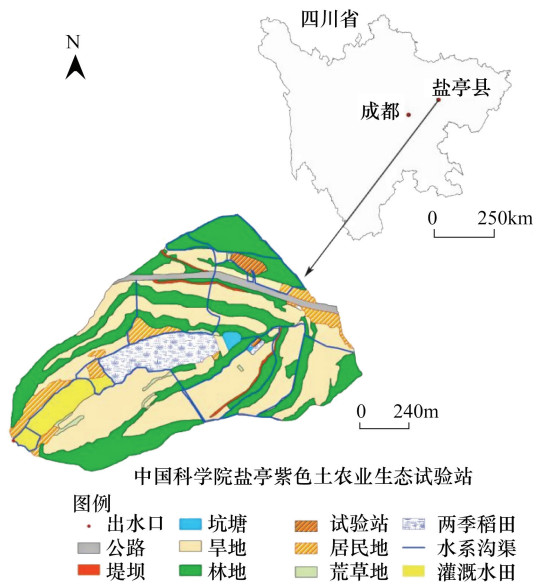


图1 流域地理位置及土地利用方式

Fig.1 Sketch map of watersheds location and different land-use

1.2 采样及分析方法

本研究通过在流域出口设置截留三角堰,并安装 ISOC6710 水沙自动采样装置,对 2012 年 7—8 月间的 3 次典型降雨进行径流水样采集。将降雨触发模块设置为 5 mm(即降雨量超过 5 mm 时,自动采样装置运行采集地表径流),当降雨触发模块运行后,每隔 30 min 自动采集 1000 mL 径流样,直到收集完 24 个样品。样品采集后立刻送往实验室,放置于冰箱保存,并于 2012 年 9 月 5 日—10 日进行 DOC 浓度及各形态磷浓度的测定。将水样分为两份,一份用于总磷(TP)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)的测定,另一份水样过 0.45 μm 滤膜后用于溶解态总磷(DTP)和溶解性有机碳(DOC)的测定。溶解态有机碳(DOC):用 Phoenix 8000 型 TOC 分析仪直接测定;总磷(TP):取适量未过滤水样经过硫酸钾消煮后用钼酸铵紫外分光光度法测定(GB11893—89);溶解态总磷(DTP):滤液经过硫酸钾消煮后用钼酸铵紫外分光光度法测定;磷酸盐(PO₄³⁻):取适量水样用钼酸铵紫外分光度

法测定(GB11893—89);溶解态有机磷(DOP)=DTP-PO₄³⁻;颗粒态磷(PP)=TP-DTP。以上分析方法详见《水环境要素观测与分析》^[12]。

计算降雨径流累积流量及径流碳、磷流失负荷分别利用公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times (q_i + q_{i+1})/2 \quad (1)$$

$$M_j = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \frac{(c_i + c_{i+1})}{2} \times \frac{(q_i + q_{i+1})}{2} \quad (2)$$

式中, Q 为累积径流量(m³); M_j 为第 j 种污染物累积负荷(g); c_i 为第 j 种污染物在 i 监测时的浓度(mg/L); q_i 为样本 i 在监测时的流量(m³/s); Δt 为样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔(s)。

用污染物累积负荷曲线($M(V)$)评估次降雨径流的初期冲刷效应及污染物分布情况,污染物累积率可用(3)式表达:

$$\frac{\sum_{i=1}^J C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^V C_i Q_i \Delta t_i} = f \left[\frac{\sum_{i=1}^J Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^V Q_i \Delta t_i} \right] = f \left[\frac{\sum_{i=1}^J V_i}{\sum_{i=1}^V V_i} \right] \quad (3)$$

式中, Δt 同上式(1)、(2); C_i 为相邻两次检测的平均浓度(mg/L); Q_i 为相邻两次监测的平均径流量(m³/s); V 表示样本 i 监测总次数; J 表示样本 i 监测次数。

用 SPASS 软件进行皮尔逊相关分析并利用 Oringe8.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 次降雨事件及径流过程特征

本研究共监测了发生于 2012 年 7 月 20 日与 8 月 20 日、8 月 30 日 3 次降雨径流过程。表 1 为 3 次降雨特征描述,根据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准,将 2012 年 7 月 20 日降雨类型划为暴雨(59.4 mm),8 月 20 日降雨为大雨(33.2 mm),8 月 30 日降雨为中雨(19.6 mm)。3 次降雨事件共产生径流 20399.8 m³。图 2 为次降雨径流变化特征,受前期降雨影响,7 月 20 日降雨初期径流量较高,降雨开始后 300 min 达流量峰值,峰值流量 0.352 m³/s,后随降雨强度的减小而逐渐降低;8 月 20 日降雨径流曲线呈双峰状,峰值分别出现在降雨后 300 min 和 800 min,流量峰值分别为 0.135 m³/s 和 0.138 m³/s;8 月 30 日降雨径流达峰值较晚,降雨 500 min 后降

雨径流量迅速达峰值后迅速降低并趋于平缓。

表 1 3 场降雨特征描述

Table 1 Rainfall characteristics under different rain events				
降雨日期 Rainfall date	降雨量/mm Rainfall	累积径流量/m ³ Accumulated runoff	降雨历时/h Rainfall duration	降雨类型 Rainfall type
2012-07-20	59.4	13068.69	6	暴雨
2012-08-20	33.2	5611.767	12	大雨
2012-08-30	19.6	1719.336	10	中雨
总量 Total	112.2	20399.8	—	—

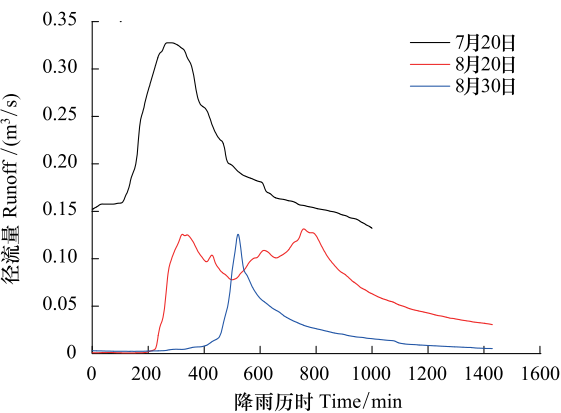


图 2 3 次降雨径流变化曲线

Fig.2 Changes of runoff discharge at different rainfall events

2.2 次降雨 DOC 及各形态磷输出变化

2.2.1 次降雨过程 DOC 浓度变化特征

图 3 为次降雨径流 DOC 浓度变化曲线。次降雨径流 DOC 浓度峰值的出现均早于流量峰值,径流 DOC 浓度变化曲线呈多峰状,与次降雨径流变化曲线存在差异。次降雨径流 DOC 浓度变化趋势总体表现为:随降雨历时的延长而略有降低后迅速升高,达峰值后降低并趋于平稳。该变化趋势与紫色土坡耕壤中流 DOC 输出特征相似。这可能是由于坡耕地为主的紫色土流域,其壤中流极为发育,对紫色土坡耕地连续 2a 的监测数据显示,壤中流平均累计径流量为地表径流量的 5 倍,壤中流 DOC 年输出负荷为地表径流的 4.8 倍^[13]。对比 3 次降雨事件,结果显示,8 月份两次降雨事件径流末期 DOC 浓度略高于初始值,而 7 月 20 日降雨径流末期 DOC 浓度显著低于初始值。相关研究^[14-16]均表明淹水状态能够增加土壤 DOC 的含量,8 月份两场降雨,降雨时间长,土壤与雨水充分接触,使得土壤 DOC 含量增加,因此在降雨末期,径流 DOC 浓度略高于降雨初期,而 7 月 20 日降雨量大,降雨径流对 DOC 的稀释作用

明显强于淹水条件对土壤 DOC 含量增加的影响。不同降雨事件径流 DOC 浓度变化存在显著差异:7 月 20 日降雨径流 DOC 浓度变化范围为 1.2—8.3 mg/L,平均浓度 4.04 mg/L,变异系数高达 59%;8 月 20 日降雨径流 DOC 最大浓度 6.6 mg/L 最小浓度 3.2 mg/L 平均浓度 5.2 mg/L,变异系数 13%;8 月 30 日径流 DOC 浓度变异系数为 17%。可见,暴雨对径流 DOC 浓度变化的影响最大。

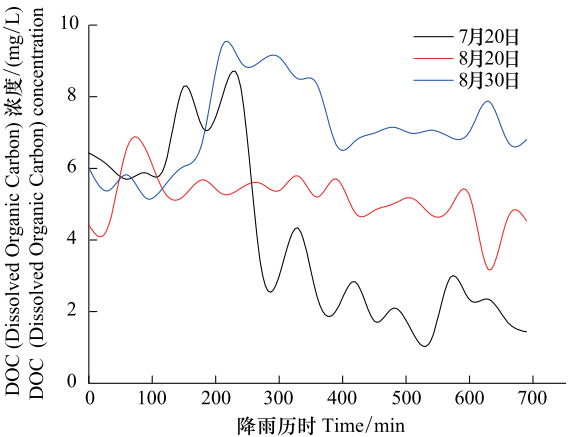


图 3 次降雨径流 DOC 浓度变化曲线

Fig.3 Variation of DOC concentration in runoff under different rainfall events

2.2.2 次降雨事件不同形态磷浓度动态变化特征

图 4 分别为 3 次降雨径流中各形态 P 的浓度变化过程曲线。3 次降雨事件 TP 浓度峰值出现的先后顺序为 7 月 20 日>8 月 20 日>8 月 30 日,浓度峰值出现在流量峰值之前。径流磷的迁移形态主要有两种:颗粒态(PP)和溶解态(DTP)。次降雨产流过程中 PP 和 TP 的时间-浓度曲线一直很接近,TP 浓度随 PP 浓度的变化而变化,分析表明 PP 占次降雨径流 TP 的百分比分别为 83%、78%、78%,说明泥沙结合态是紫色土小流域磷素随地表径流迁移的主要

形态。溶解态磷(DTP)是植物及微生物可直接利用的磷,亦为速效磷,其在3次降雨径流中的含量较低,在0.03—0.17 mg/L之间。溶解性有机磷(Dissolved Organic Phosphorus, DOP)和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是DTP的组成部分,次降雨过程中初始径流DOP随DTP变化一致,但是随着降雨的持续,次降雨径流

DOP相继被 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 取代,表现出随DTP的变化迅速增减,这可能是由于吸附于土壤胶体中的无机磷在长时间水的作用下解吸溶于水使得 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量升高所致。同时表明径流末期DTP的含量主要受控于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。

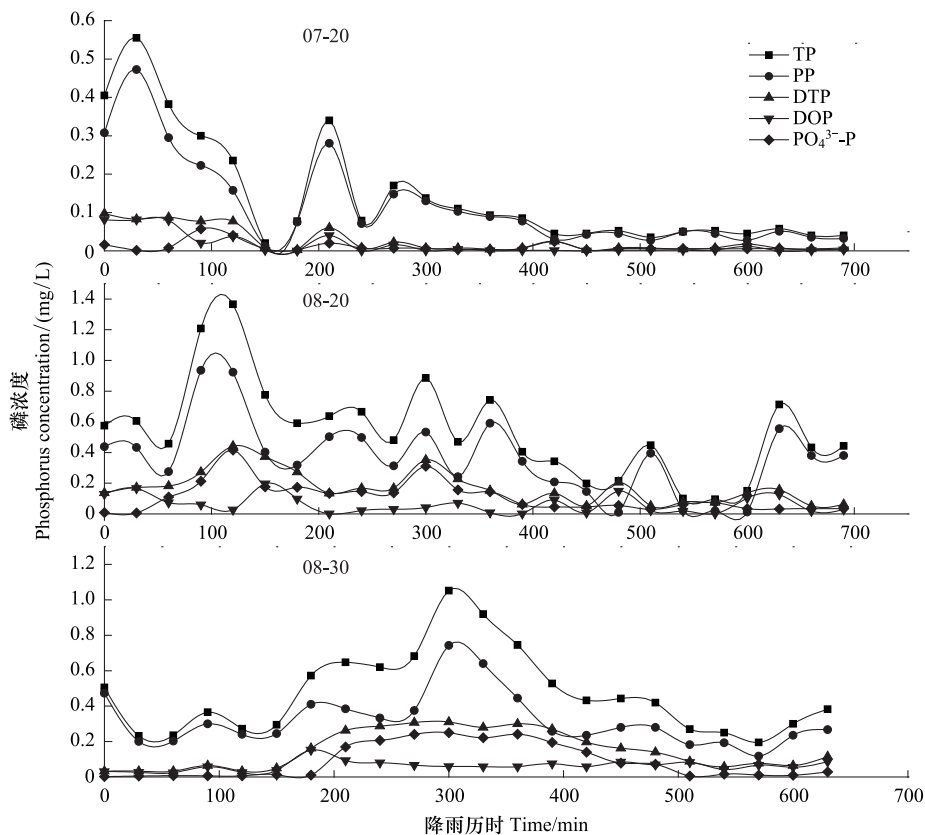


图4 次降雨径流各形态磷浓度变化

Fig.4 Variation of P concentration in overland flow in different rainfall events

2.2.3 次降雨事件碳、磷输负荷

表2为次降雨径流碳、磷输负荷。2012年3次降雨共产生径流20399.8 m^3 ,输出溶解性有机碳(DOC)83.19 kg,平均浓度为4.08 g/m^3 ;TP输出负荷5.1 kg,平均浓度0.25 g/m^3 ,80%以PP形式输出。各次降雨径流C、P输出负荷差异较大,单次降雨过程中土壤DOC输出负荷大小顺序为7月20日>8月20日>8月30日,土壤P输出负荷大小顺序为8月20日>7月20日>8月30日,引起该结果的原因可能和降雨历时、降雨量和前期降雨有关:(1)受前期降雨影响,土壤P已被大量带走,使得土壤P含量较低;(2)7月20日降雨量最大,但降雨历时最短,仅为6h,而8月20日降雨历时长达12h,单位径流与土壤表层养分作用时间延长,而使大量土壤磷素随地

表径流迁移,由于受7月20日前期降雨的影响,土壤长期处于淹水状态,有利于土壤DOC的解析,进而使土壤DOC含量增加,在地表径流冲刷及淋溶下渗的共同作用下,大量土壤DOC随径流迁移。对次降雨径流过程中24组径流量和DOC、P输出负荷做相关性分析,其 r 值分别为:7月20日 $r_{\text{DOC}}=0.528$, $r_{\text{TP}}=0.148$;8月20日 $r_{\text{DOC}}=0.968$, $r_{\text{TP}}=0.825$;8月30日 $r_{\text{DOC}}=0.999$, $r_{\text{TP}}=0.963$,除7月20日TP外,次降雨径流量同养分输出负荷表现出较高的相关性,说明降雨径流量是影响径流DOC、P输出负荷的主要因素。对次降雨径流量同DOC、TP输出负荷进行回归分析(表3),可见,在大雨和中雨条件下,径流量和DOC存在明显的线性关系,而TP输出负荷同降雨径流量存在显著地多项式关系,且均强于暴雨条

件下,表明该经验方程更适合于大雨及中雨条件下 土壤碳、磷输出量的估算。

表 2 次降雨径流不同形态碳、磷输出负荷

Table 2 Different forms of C and P loads under rainfall-runoff events

降雨日期 Rainfall date	累积径流量 Accumulated runoff/m ³	DOC/g	TP/g	PP/g	DTP/g	DOP/g	PO ₄ ³⁻ -P/g
2012-07-20	13068.69	44415.74	1392.214	1167.491	231.55	124.54	108.37
2012-08-20	5611.767	26788.92	2427.998	1891.331	536.66	197.86	338.8
2012-08-30	1719.336	11988.48	1270.38	984.74	285.64	117.85	167.79
总量 Total	20399.8	83193.15	5090.59	4043.56	1053.85	440.25	614.97
平均值 Mean		27731.05	1696.85	1347.86	351.28	146.75	204.98
平均浓度 Mean concentration	—	4.08±1.08	0.25±0.31	0.20±0.24	0.052±0.07	0.022±0.03	0.03±0.04

DOC:溶解性有机碳 Dissolved organic carbon;TP:总磷 Total phosphorus;PP:颗粒态磷 Particulate phosphorus;DTP:溶解性总磷 Dissolved total phosphorus;DOP:溶解性有机磷 Dissolved organic phosphorus;PO₄³⁻-P:磷酸盐 Phosphate

表 3 次降雨径流量与 DOC、TP 输出负荷回归方程

Table 3 The regression equation of runoff and DOC, TP load under rainfall-runoff events

降雨日期 Rainfall date	降雨类型 Rainfall patterns		回归关系 Regression model	R ²	P
2012-07-20	暴雨	DOC	Y= 5. 256X-463.9	0.279	<0.05
		TP	Y= 0.003X ² -2.516X+550	0.347	<0.05
2012-08-20	大雨	DOC	Y= 5.017X-1.621	0.972	<0.05
		TP	Y= 0.003X ² -0.314X+5.654	0.766	<0.05
2012-08-30	中雨	DOC	Y= 7.028X+2.807	0.999	<0.05
		TP	Y= -0.00X ² +0.290+2.2	0.963	<0.05

2.2.4 次降雨事件碳、磷输出负荷在径流过程中的分布特征

初期冲刷效应指径流产生的污染物负荷运移大部分由初期径流完成,用污染物负荷积累曲线可评估降雨径流的初期冲刷效应^[17]。影响初期冲刷效应的因素复杂,汇流区面积、降雨强度等对初期冲刷效应有着显著影响,但大约只有 60%—80%的降雨事件能够产生初期冲刷现象^[18]。图 5 分别给出了 7 月 20 日、8 月 20 日、8 月 30 日 3 次降雨径流污染物负荷积累曲线。由图可知,7 月 20 日和 8 月 20 日降雨过程中,DOC 和 TP 在 45°斜线上方,表明其输出负荷集中于径流过程的前半段,径流污染物初期冲刷效应突出,但是 8 月 30 日降雨过程中,污染物负荷集中于径流过程的后边段,径流初期冲刷效应微弱,次降雨事件径流污染物初期冲刷效应强弱顺序为:暴雨>大雨>中雨,可见降雨量对径流污染物初期冲刷效应存在一定影响,降雨量越大,径流污染物初期冲刷效应越强。在前 50% 的流量中,3 次降

雨的 DOC 和 TP 输出负荷分别为对应总输出负荷的 60%、80%;70%、60%;35%、10%,在大雨和中雨条件下,DOC 的初期冲刷效应略高于 TP,而在暴雨条件下,DOC 的初期冲刷效应低于 TP,这可能与降雨历时及土壤 DOC、TP 的输出方式有关。由于坡耕地为主的紫色土小流域内壤中流及其发育,在长时间壤中流和地表径流的共同作用下,使得降雨初期径流 DOC 含量显著增加,而随降雨历时的延长,土壤 DOC 不断减少,随径流输出的 DOC 逐渐减少,P 的输出方式主要以 PP 态随地表径流迁移^[19],而紫色土地区地表径流产流方式为蓄满产流,只有当土壤水饱和后才可能出现 PP 态磷素的迁移,因此,相比于 DOC,土壤 TP 的初期冲刷效应略低。

3 讨论

3.1 降雨条件对土壤养分流失的影响

土壤养分的迁移是一个十分复杂的过程,受到众多因素的影响,如降雨特性、下垫面特性、植被条

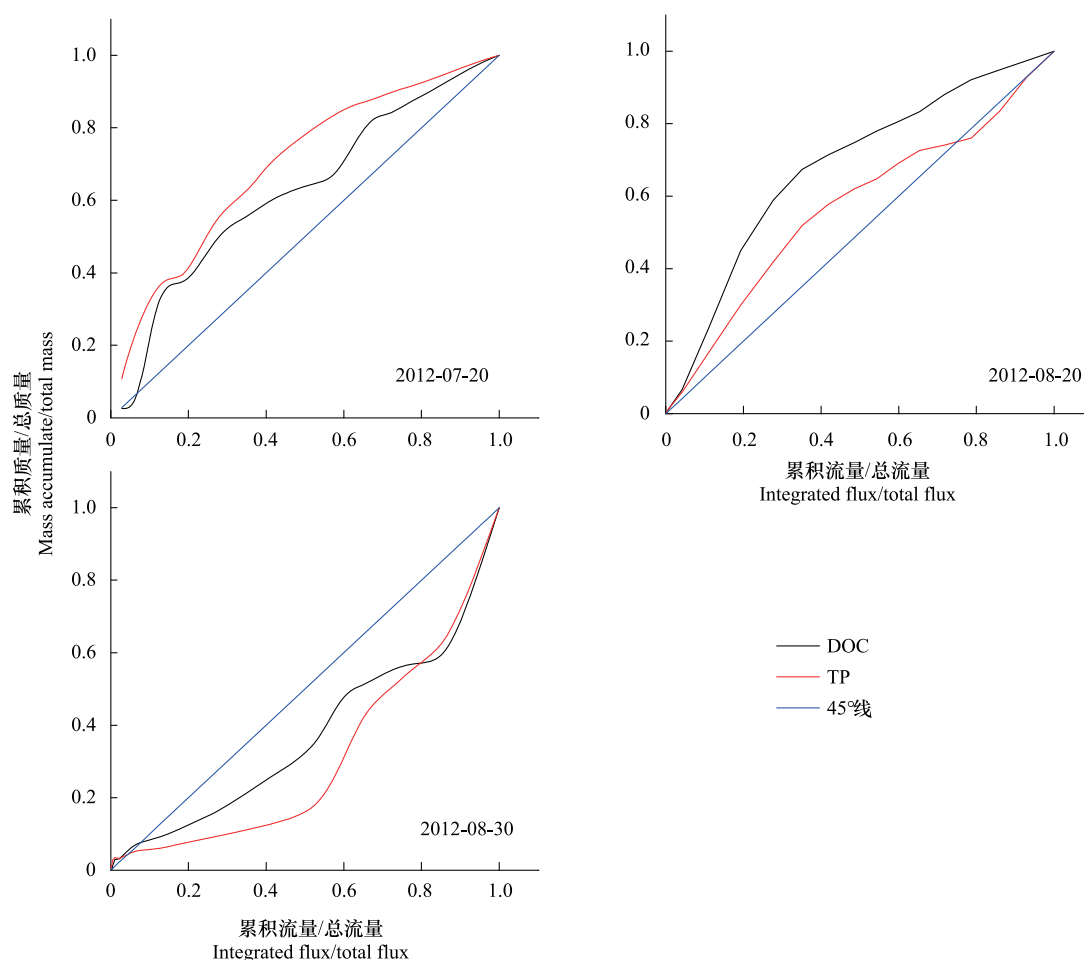


图 5 次降雨径流污染物 M(V) 曲线

Fig.5 Pollutant mass-based first flush effects for rainfall runoff

件、坡度、耕作方式、土壤抗蚀性、土壤的理化性质及温度等。贾洪文^[20]对杨凌地区的研究结果表明降雨是土壤养分流失的主要原因。径流冲刷是泥沙及养分流失的主要动力,而营养元素吸附泥沙表面随地表径流迁移是其流失的主要方式^[21]。对紫色土流域 3 次典型降雨事件的分析结果显示,降雨条件对该区土壤碳、磷输出的影响存在显著差异。暴雨条件下,由于降雨历时短径流量大,径流水的横向运动明显强于纵向淋溶作用,因此对地表冲刷效应明显,使得大量颗粒态磷(PP)随地表径流输出。在降雨初期,径流 TP 含量迅速升高,径流 TP 浓度峰值的出现明显早于大雨和中雨,达峰后由于径流量的增加,稀释作用明显而使得其在径流中的浓度迅速降低,末期浓度仅为 0.04 mg/L,远低于大雨和中雨条件下的 0.44 mg/L 和 0.38 mg/L。对次降雨径流碳、磷输出负荷的研究显示,大雨对土壤磷的输出贡献高于暴雨,由大雨造成的土壤 TP 输出量为 2.428

kg,而由暴雨引起的土壤磷素迁移量仅为 1.392 kg,可见,由长历时大雨造成的土壤养分流失不容忽视,降雨历时可能为影响土壤养分迁移的另一主要因素。观察图 5 发现在暴雨条件下,径流污染物主要集中于降雨的前期,而长历时大雨条件下,径流污染物主要集中于降雨的中期,中雨条件下,径流污染物则集中于降雨的后期。

3.2 紫色土流域降雨径流对环境的影响

磷是引起水体富营养化的主要限制因子。由于水中生物可直接利用的磷大部分为溶解态,多数颗粒态磷不能被利用,故对水质没有直接影响。次降雨径流 DTP 的含量分别为 0.017、0.095、0.16 mg/L,8 月 20 日和 8 月 30 日降雨 DTP 的浓度远远高于引起水质问题的临界浓度,而 7 月 20 日 DTP 的浓度也已接近临界浓度,表明 3 次降雨事件均会对小流域水质健康造成一定威胁。PP 是土壤磷流失的主要形式,其在水中的浓度最高,分别为 0.089、0.34、0.57

mg/L 使其成为潜在磷源,同样威胁水质健康。C/P 比是评价磷有效性的评价指标^[22-23],一般 C/P 越低,表明磷的有效性越高。一般土壤微生物量 C/P 比在 7—30 之间波动^[24],而 Redfield^[25]发现海水中微生物量 C/P 比接近恒定值,为 106:1,生物量 C/P 比值小说明微生物矿化有机质中释放磷的潜力大,C/P 比值高则说明微生物对有效磷具有同化作用。水中 DOC 及 DTP 是微生物可直接利用的元素,因此以 DOC/DTP 的比值代替水中 C/P 比更能说明磷的有效性的高低。3 次降雨径流 DOC/DTP 比值分别为 192、48、42.1,其中大雨和中雨条件下造成的土壤 DOC 和 DTP 的输出负荷比值远低于水中微生物量 C/P 比,表明由大雨和中雨引起的土壤养分流失对水质的影响高于暴雨。但由于外源碳输入为水中微生物提供了一定的能源,水中微生物活性增强,数量增加,同样会影响水体质量,另外由于水中 DOC 含量增加而影响水下光场^[26],降低水中溶解氧进一步加剧水质恶化,引起水环境问题。综上表明,小流域土壤碳、磷流失严重,对水质健康造成严重威胁。

4 结论

本研究通过对川中紫色土小流域 3 次降雨径流碳、磷动态变化的研究,得出以下结论

(1) 3 次降雨共产生径流 20399.8 m³,碳、磷输出负荷分别为 83.19 kg 和 5.1 kg,次降雨径流 C、P 输出负荷差异较大,7 月 20 日产生径流量 13068.69 m³,DOC、TP 输出负荷分别为 44415.74、1392.214 g;8 月 20 日产生径流量为 5611.767 m³,DOC、TP 输出负荷分别为 26788.92、2427.998 g;8 月 30 日径流量为 1719.336 m³,DOC、TP 输出负荷分别为 11988.48、1270.38 g。

(2) 径流磷的浓度曲线同流量曲线相似。径流磷主要以 PP 态流失,PO₄³⁻-P 是径流 DTP 的主要存在形式。三次降雨 PP 输出负荷分别为 1167.491、1891.331、984.74 g;PO₄³⁻-P 输出负荷分别为 108.37、338.8、167.79 g。DOC 浓度随降雨历时的延长而降低,后迅速升高,在达峰值后逐渐降低并趋于平稳。

(3) 次降雨过程径流 DOC 的输出浓度分别为 3.37、4.77、6.97 mg/L, TP 输出浓度分别为 0.11、0.43、0.74 mg/L。次降雨径流 C/P 分别为 192、48、42.1,相比于暴雨而言,大雨和中雨带来的水质问题

需引起关注。

References:

- [1] Zhu B, Zhou M H, Kuang H F, Wang T. Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21 (1): 102-109.
- [2] Gao Y, Zhu B, Wang Y K, Zhang J Z, Wang T. Phosphorus transportation from slope cropland of purple soil at natural and stimulated rainfall events. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 34-37.
- [3] Gao Y, Zhu B, Zhou P, Wang T, Miao C Y. Non-point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1371-1376.
- [4] Luo Z X, Zhu B, Wang T, Tang J L, Wang D, Xin W. Artificially simulated coupling characteristics of different sediment nutrient with sediment losses in slopeland of purple soil, China. *Resources and environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(3): 379-383.
- [5] Jiang R, Zhu B, Tang J L, Luo Z X. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 659-666.
- [6] Smith J L, Paul E A. The significance of soil microbial biomass estimated [D] // Bollage J M, Stotzaky G, eds. *Soil Biochemistry*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991: 359-396.
- [7] Miller J D, Adamson J K, Hirst D. Trends in stream water quality in environmental change network up-land catchments: the first 5 years. *Science of the Total Environment*, 2001, 265 (1/3): 27-38.
- [8] Gao Q Z, Shen C D, Sun Y M, Yi W X, Fu J M, Sheng G Y. Seasonal variations of riverine organic carbon contents in Makou and Hekou gauge stations of the Pearl River. *Geochimica*, 1999, 28(3): 273-280.
- [9] Jiang W, Hou Q Y, Yang Z F, Xia X Q, Zhong C. Migration and deposition flux of organic carbon in the Wuyuerhe River Basin in Heilongjiang Province. *Geoscience*, 2011, 25(2): 384-392.
- [10] Liu G C, Gao M R, Zhang J H, Li Y, Zhang X W. Soil erosion characteristics of slope land under alternative tillage systems in central hilly area of Sichuan, China. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(S1): 65-70.
- [11] Song Q H, Yang Z F. Thinking of integrated management of urban rivers in China. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 377-382.
- [12] Xie X Q, Wang L J. *Observation and Analysis of Water Environment Factors*. Beijing: China Standards Publishing House, 1998: 257-278.

- [13] Hua K K, Zhu B, Wang X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 81-88.
- [14] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [15] Chow A Y, Tanji K K, Cao S, Dahlgren R A. Temperature, water content and wet - dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural pest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 477-488.
- [16] Christ M J, David M B. Dynamics of extractable organic carbon in spodosol forest floors. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1171-1179.
- [17] Sansalone J J, Cristina C M. First flush concepts for suspended and dissolved solids in small impervious watersheds. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, 130(11): 1301-1314.
- [18] Hall M J, Ellis J B. Water quality problems of urban areas. *GeoJournal*, 1985, 11(3): 265-275.
- [19] Uusi-Kämpä J, Braskerud B, Jansson H, Syversen N, Uusitalo R. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 151-158.
- [20] Jia H W. An analysis of the relationship between rainfall and soil nutrient loss. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2007, (1): 31-23.
- [21] Liu B Z, Li G L, Wu F Q, Zhao X G. The regular patterns of the loss of soil nutrients on southern loess plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(2): 77-86.
- [22] Coulson J C, Butterfield J. An investigation of the biotic factors determining the rates of plant decomposition on blanket bog. *The Journal of Ecology*, 1978, 66(2): 631-650.
- [23] Schlesinger W H, Hasey M M. Decomposition of chaparral shrub foliage: losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves. *Ecology*, 1981, 62(3): 762-774.
- [24] Peng P Q, Zhang W J, Tong C L, Qiu S J, Zhang W C. Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake flood plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(10): 1872-1878.
- [25] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea water [D]// Hill M N. *The Sea*. Vol. 2. New York: Interscience, 1963: 26-77.
- [26] Liu M, Yu W T, Jiang Z S, Zhao X. Influencing factors and ecological effects of dissolved organic carbon in soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 758-764.

参考文献:

- [1] 朱波,周明华,况福虹,汪涛. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 102-109.
- [2] 高扬,朱波,王玉宽,张进忠,汪涛. 自然和人工模拟降雨条件下紫色土坡地的磷素迁移. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 34-37.
- [3] 高扬,朱波,周培,汪涛,缪驰远. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出的人工模拟研究. *农业科学环境学报*, 2008, 27(4): 1371-1376.
- [4] 罗专溪,朱波,汪涛,唐家良,王冬,辛伟. 紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(3): 379-383.
- [5] 蒋锐,朱波,唐家良,罗专溪. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量. *水力学报*, 2009, 40(6): 659-666.
- [8] 高全洲,沈成德,孙彦敏,易惟熙,傅家谟,盛国英. 珠江马口站、河口站断面水体有机碳含量的季节变化. *地球化学*, 1999, 28(3): 273-280.
- [9] 姜伟,侯青叶,杨忠芳,夏学齐,钟聪. 黑龙江省乌裕尔河流域有机碳迁移与沉积通量. *现代地质*, 2011, 25(2): 384-392.
- [10] 刘刚才,高美荣,张建辉,李勇,张先婉. 川中丘陵区典型耕作制下紫色土坡耕地的土壤侵蚀特征. *山地学报*, 2001, 19(S1): 65-70.
- [11] 宋庆辉,杨志峰. 对我国城市河流综合管理的思考. *水科学进展*, 2002, 13(3): 377-382.
- [12] 谢贤群,王立军. *水环境要素观测与分析*. 北京:中国标准出版社, 1998:257-278.
- [13] 花可可,朱波,王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 81-88.
- [20] 贾洪文. 降雨与土壤养分流失关系分析. *水土保持应用技术*, 2007, (1): 21-23.
- [21] 刘秉正,李光录,吴发启,赵晓光. 黄土高原南部土壤养分流失规律. *水土保持学报*, 1995, 9(2): 77-86.
- [26] 柳敏,宇万太,蒋子绍,赵鑫. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应. *土壤通报*, 2007, 38(4): 758-764.