

不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征

杨丽霞^{1,3}, 杨桂山^{1*}, 苑韶峰², 吴业^{1,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 浙江工商大学公共管理学院土地资源管理系, 杭州 310035; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以太湖流域典型区域无锡市近郊区鸿声镇的蔬菜地为研究对象, 采用人工模拟降雨的方法, 通过野外径流小区试验, 研究了不同雨强对菜地土壤磷素径流流失的影响. 结果表明, 初始产流时间随雨强的增大呈幂函数减小 ($R^2 = 0.99$), 径流量在雨强较小时, 缓慢上升, 但随着雨强的增大急剧上升, 在雨强 0.83 、 1.17 和 $1.67 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 总磷(TP)和颗粒态磷(PP)都表现为初始流失浓度较高, 随降雨历时延长略有下降, 最终趋于稳定, 而在大雨强 $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, TP 和 PP 呈现波浪式起伏, 没有明显的变化趋势; 在整个降雨-径流过程中, 溶解态磷(DP)变化比较平缓, 占 TP 的比例为 $20\% \sim 32\%$, 而 PP 占 TP 的比例为 $68\% \sim 80\%$, 其变化规律与 TP 相一致, 由此可见, PP 是土壤磷素流失的主要形态; 通过对比不同雨强下不同形态磷素的流失率, 发现 TP 的流失率, 大雨强 $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 是小雨强 $0.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 20 倍, 而 DP 的流失率, 却是 33 倍, 这表明随着雨强的增加, 加速土壤 PP 流失的同时, 也大大促进了 DP 的流失, 主要原因是降雨前表施磷肥, 使得磷肥中大量的无机态磷溶解释放到水环境中, 增加了 DP 的流失, 从而会加重受纳水体富营养化的程度.

关键词: 雨强; 土壤磷素; 径流; 人工模拟降雨; 磷素流失速率

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1763-07

Characteristics of Soil Phosphorus Runoff Under Different Rainfall Intensities in the Typical Vegetable Plot of Taihu Basin

YANG Li-xia^{1,3}, YANG Gui-shan¹, YUAN Shao-feng², WU Ye^{1,3}

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Department of Land Resources Management, College of Public Administration, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Experiments of field runoff plots, which were conducted at vegetable plots in Hongsheng town of Wuxi city—the typical region of Taihu Basin, were designed to assess the effects of different rainfall intensities on soil phosphorus runoff loss from vegetable plots by artificial rainfall simulations. Results showed that there was a relationship of power function between initial runoff-generation time and rainfall intensity. Runoff amount slowly increased under small rainfall intensity, but rapidly increased with rainfall intensity increase. The concentrations of total phosphorus (TP) and particulate phosphorus (PP) were higher at the early stage, then gradually decreased with time and finally reached a comparative steady stage under 0.83 , 1.17 and $1.67 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. However they indicated no obvious trend except wavy undulation under $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. In the course of rainfall-runoff, dissolved phosphorus (DP) gently varied and accounted for $20\% \sim 32\%$ of TP. PP was $68\% \sim 80\%$ of TP and its change trend was consistent with TP. Therefore, PP was main loss form of soil phosphorus runoff. Comparison of different phosphorous loss rate under different rainfall intensities suggested that loss rate of TP and DP under $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ was 20 times and 33 times higher than that under $0.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, which showed that loss rate of PP and DP increased with the increase of rainfall intensities. Results indicated that lots of inorganic dissolved phosphorus (DIP) of phosphorous fertilizer was discharged into water environment by using fertilizer in soil surface before rainfall, which increased loss of DP and greatly aggravated degree of water eutrophication.

Key words: rainfall intensity; soil phosphorus; runoff; artificial simulations rainfall; phosphorous loss rate

太湖的主要环境问题是水体富营养化^[1], 而磷是水体富营养化最关键的限制因子, 所以控制磷含量是解决太湖水体富营养化的关键. 据报道, 农业面源污染对太湖水体磷素的贡献率为 15.1% , 其中农田对面源污染贡献率占 19.2% ^[2], 农田中又以蔬菜基地中土壤磷素累积最多(蔬菜基地多数在城市近郊), 其对水体磷素污染威胁最大^[3].

蔬菜地是太湖流域的主要土地利用方式, 种植

面积大, 肥料投入多, 蔬菜地磷肥使用量是水田、旱地的几倍, 长期向蔬菜地大量使用磷肥会导致土壤磷明显富集. 国外近期研究表明, 当土壤速效磷含量达到作物生长的适宜水平时(Olsen-P 和 Bray-P 分别

收稿日期: 2006-10-18; 修订日期: 2006-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371111)

作者简介: 杨丽霞(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为资源利用与环境效应, E-mail: yanglixianj2001@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gsyang@niglas.ac.cn

为 25 和 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),就水质保护来说已处于过高水平^[4,5].而太湖流域的蔬菜地是高富磷土壤,其速效磷含量达 36.7 ~ 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[6],已经大大超过作物的适宜生长水平,且该区高温多雨,土壤中富余的磷素容易随地表径流进入水体.由此可见,蔬菜地对水体磷污染威胁最大,虽然国内外学者对土壤磷素向水体的迁移做了大量的研究^[7~9],但是主要侧重于一般旱地、水稻田和牧场,而高富集磷的蔬菜地对水环境的影响报道较少.因此,了解蔬菜地土壤磷素向水体迁移的动态特征,进一步控制蔬菜地土壤磷素的流失,对减少水体富营养化具有重要意义.降雨是土壤磷素流失的主要驱动力,也是其流失的溶剂和载体,研究不同雨强下蔬菜地土壤磷素的流失特征,对探讨富磷土壤的农田向水体的迁移机制、制定相应的控制措施具有现实意义.但是,天然降雨周期长,难以人为控制,资料获取较困难,而人工模拟降雨的研究方法可以在很大程度上加快研究进程,在短时间和不受自然条件的限制下获得大量的资料,尽可能地量化影响因素,便于深入研究降雨强度对土壤磷素流失的影响^[10].本实验选择太湖流域典型的蔬菜地为对象,采用人工模拟降雨的方法,通过野外径流小区的监测,研究了不同雨强对菜地土壤磷素径流流失的影响.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

野外试验的径流小区设在太湖流域典型区域无锡市近郊区鸿声镇的蔬菜地(种菜年限超过 10 a),该地属亚热带季风气候,年平均降水量1 100 ~ 1 200 mm,降水量主要集中在 5 ~ 9 月,占年降水的 60% 左右.土壤质地以粘壤为主,研究地以青菜为主,见图 1 所示.

供试土壤的基本理化性质如表 1 所示,各项目分析方法: pH 值(水土比 2.5:1,电位测定法);全磷($\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法);速效磷(NaHCO_3 钼锑抗比色法);有机质($\text{K}_2\text{CrO}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 氧化法);容重(环刀法)以及土壤含水量(烘干法),具体方法描述见文献[11].

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of experiment soil						
土深 /cm	容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	含水量 /%
0 ~ 10	1.23	5.85	29.75	1.23	174.47	13.30

1.2 试验仪器与试验设计

采用中国科学院水土保持研究所研制的 BX-1 型野外便携式人工模拟降雨器^[12],装置由喷头系统、驱动系统、动力系统和供水系统 4 部分组成.降雨高度 2.4 m,降雨均匀系数在 80% 以上.根据太湖流域多年的水文资料记录的暴雨特点,本试验设置了 4 种降雨强度:小雨强($0.83\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),中雨强($1.17\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1.67\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),大雨强($2.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$);其余条件为缓坡 7°,施磷肥水平为 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (本地区蔬菜地的常规磷肥使用量).



图 1 试验点在太湖流域的位置

Fig. 1 Location of experiment site in Taihu Basin

1.3 采样与分析方法

每个径流小区面积为 2 m × 1 m,在小区 2 条长边及顶端用 25 cm 高的 PVC 板围成,插入土中 15 cm 外露 10 cm,防止降雨泥沙溅出和小区外围水分进入小区,在小区下端安装不锈钢 V 型集水堰,由一塑料管连接到带有刻度的塑料桶收集径流样品.每处理设 3 个重复.平行试验分析结果表明,同一雨强对应时段的相对误差界于 5% ~ 20% 之间.后面图表所采用的数据是平行降雨实验数据的平均值.

每场降雨历时 30 min (不含产流时间).当产流发生后,每隔 5 min 采集 1 次径流样品,分别测定径流体积,混匀水样,同时用 500 mL 塑料瓶分取径流水样,用于测定径流中不同形态磷的浓度.降雨过程中收集雨水作空白对照.在降雨过程中,雨水是由混合的自来水和深井水提供,其总磷(TP)浓度为 0.055 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解态总磷(DP)浓度为 0.009 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解态无机磷(DIP)浓度为 0.001 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

测定项目包括地表径流水样中的 TP、DP 和 DIP.测定方法为:用塑料瓶分取的水样,充分摇匀,一部分直接用于径流水样 TP 的测定,采用过硫酸钾氧化,钼锑抗比色法测定;另一部分经 0.45 μm 滤膜

过滤,过滤后水样中的 TP 与径流水样 TP 的测定方法一致,DIP 采用钼锑抗比色法测定;颗粒态磷(PP)用差减法计算得出.

1.4 数据处理

采用 SPSS 统计分析软件,用 Duncan 新复极差法进行多重比较.表中不同的大、小写字母表示处理间差异分别达 0.01 和 0.05 显著水平.对于表格的同一列来说,字母相同表示处理间无显著差异,字母不同表示有显著性差异.

2 结果与讨论

2.1 雨强对降雨-入渗-径流过程的影响

土壤表层磷素随地表径流迁移是一个十分复杂的过程,受到众多因素影响,但是直接决定因素是土壤表层磷含量、土体和水三者^[13],其中水是土壤磷素的溶剂和载体,也是磷素随地表径流迁移的驱动者,它不仅使土壤磷素随径流水迁移,而且使磷素随侵蚀泥沙而迁移.因此,水的迁移过程制约和决定着土壤磷素的迁移过程,坡面降雨-入渗-径流过程,就是土壤磷素溶解、随入渗水和径流水迁移的过程^[14].

在降雨初期,土壤入渗能力大于雨强,雨水全部入渗.随着降雨量增加,土壤表层含水率逐渐增大,土壤入渗能力逐步下降,入渗率等于或小于雨强,地表开始积水,并随之产生地表径流^[15].随着降雨时间的延长和入渗率的逐渐降低,地表径流量逐渐增大.统计结果表明,雨强对降雨过程中初始产流时间和径流量有显著影响,如图 2、3 所示,初始产流时间随雨强的增大呈幂函数减小($R^2 = 0.99$),这与在人工草地上所做的模拟降雨试验的结论相一致^[16].随着雨强的增大,坡面初始产流时间缩短,在降雨时间相同的情况下,产流时间相对延长,因而产流量增大,在雨强较小时,径流量缓慢上升,但随着雨强的增大,径流量的上升明显加快,这主要与雨强增大时入渗率的下降速度加快有关.从图 2 可以看出,雨强在 $1.67\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $2.50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 有 1 个临界点,雨强小于该值时,产流强度的变化差异相对较小,但是当雨强大于该值时,产流强度的上升急剧加快.

2.2 雨强对不同形态磷随地表径流流失的影响

2.2.1 同一雨强下不同形态磷随地表径流的流失特征

雨强是土壤不同形态磷随径流迁移的驱动力,在雨强相同的情况下,土壤不同形态磷的流失变化遵循一定的规律.

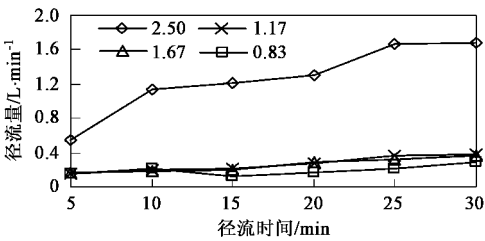


图 2 不同雨强下径流量的变化过程

Fig.2 Flow rate with time under different rainfall intensities

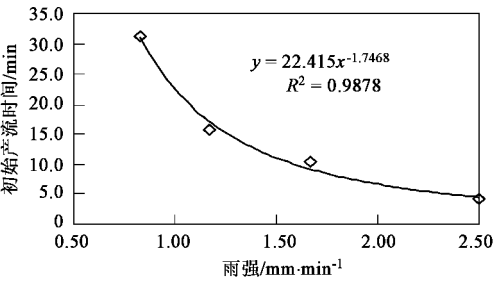


图 3 不同雨强下初始产流时间的变化

Fig.3 Initial runoff time under different rainfall intensities

从图 4~7 可知,在同一雨强条件下,不论是中雨强 (1.17 和 $1.67\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) 还是小雨强 ($0.83\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),TP 随地表径流的变化趋势基本一致,即初始阶段浓度大且下降速度快,而后下降速度减缓,大约产生径流 20 min 后,TP 浓度下降变得缓慢,直到最后趋于稳定,这可能是由于径流早期,土壤表层 TP 相对比较富集,随着时间推移,TP 相对减少,径流与土壤的相互作用达到相对平衡时,TP 的流失渐趋平缓.在整个径流过程中,PP 浓度占 TP 浓度的 $68\% \sim 80\%$,因此,PP 浓度的变化趋势与 TP 基本一致,由此可见,PP 随地表径流搬运迁移是磷的主要流失形态,这与其它研究结果一致^[17,18].PP 虽然被悬浮颗粒所吸附,但在适宜的条件下可向水体释放并转化为生物可利用磷^[19].PP 随径流进入表面水体,是表面水体内源污染的主要因素,严重时可以在切断外源输入的情况下引起水体富营养化^[20].

DP 和 DIP 在径流过程中变化趋势比较平缓,分别保持在 $0.52 \sim 2.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.30 \sim 1.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在整个降雨-径流过程中,尽管 DP 只占 TP $20\% \sim 32\%$,但是其平均浓度 $0.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 已经显著超出水体(湖泊)富营养化的标准^[21],同时 DIP 占 DP 浓度的大部分 ($58\% \sim 77\%$),又是生物可直接利用的无机磷酸盐^[22],随径流迁移的最小浓度 ($0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 也远远超过水体富营养化的警戒线 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可

见其造成的地表水污染的潜在影响不容忽视。

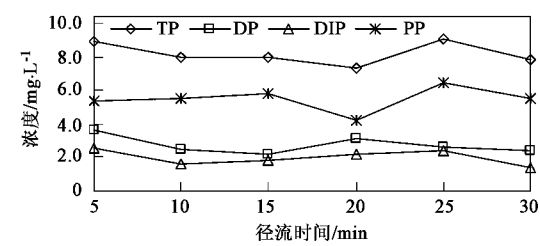


图 4 不同形态磷随径流的流失特性(2.50 mm·min⁻¹)
Fig.4 Characteristics of different phosphorus in surface runoff(2.50 mm·min⁻¹)

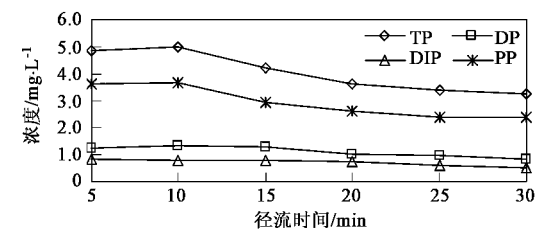


图 5 不同形态磷随径流的流失特性(1.67 mm·min⁻¹)
Fig.5 Characteristics of different phosphorus in surface runoff(1.67 mm·min⁻¹)

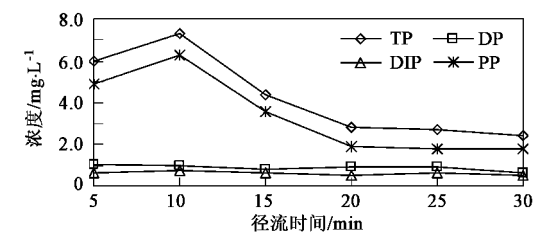


图 6 不同形态磷随径流的流失特性(1.17 mm·min⁻¹)
Fig.6 Characteristics of different phosphorus in surface runoff(1.17 mm·min⁻¹)

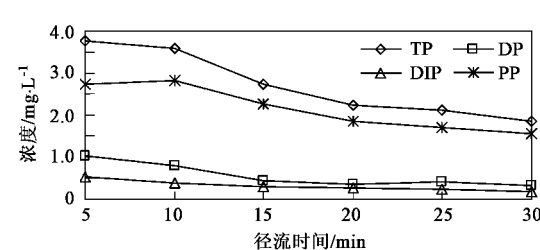


图 7 不同形态磷随径流的流失特性(0.83 mm·min⁻¹)
Fig.7 Characteristics of different phosphorus in surface runoff(0.83 mm·min⁻¹)

但是在雨强 2.50 mm·min⁻¹时,TP 和 PP 浓度随地表径流呈现波浪式起伏,没有明显下降趋势(图

4),这与梁涛等^[23]在菜地上开展的模拟降雨结果一致,主要原因可能是产流和表层土壤相互作用所引起的,产流初期,径流量较少,未能将大量的土壤携带进入到径流中去,相应地径流从土壤中获得磷素量较少,径流中磷素的浓度稍有降低;但是由于雨强较大,雨滴对地表的撞击作用就大,土粒易分散飞溅,会使得径流中更多的土壤颗粒进入到径流中去,大量的土壤颗粒进入到径流中,径流从土壤中获得更多的磷素,从而使得径流中磷素的浓度基本不变,当径流量和土壤表层相互作用达到最充分时,径流中磷素的浓度升高,随着降雨历时的延长,进入到径流中的土壤颗粒数量减少,使得径流中磷素含量也减少,TP 和 PP 浓度逐渐降低,但是降雨结束后,TP 浓度仍旧很高,高达 7.83 mg·L⁻¹,由此可见,大暴雨所引起的蔬菜地土壤磷素的流失对水体富营养化的威胁更大。

2.2.2 不同雨强下不同形态磷随地表径流的流失特征

雨强是影响土壤磷素向水体迁移的重要因素之一.不同的雨强,由于打击分散土壤颗粒的力度和产生的径流量不同,从而引起土壤磷素径流流失的变化规律也不同。

从图 8 可以看出,在不同雨强下,不同形态的磷随径流流失的变化过程是有差异的,但也表现出一定的规律性,TP 和 PP 浓度都是雨强 2.50 mm·min⁻¹时最大,其次是雨强 1.17 mm·min⁻¹和 1.67 mm·min⁻¹,最后是小雨强 0.83 mm·min⁻¹;而对于 DP 和 DIP 浓度的变化,却遵循 2.50 mm·min⁻¹ > 1.67 mm·min⁻¹ ≥ 1.17 mm·min⁻¹ > 0.83 mm·min⁻¹,但是 DP 和 DIP 的浓度变化在 3 种雨强(1.67、1.17 和 0.83 mm·min⁻¹)下差异不显著。

在雨强 2.50 mm·min⁻¹时,TP、DP、DIP 和 PP 平均浓度明显与另 3 种雨强有较大的差异,其 TP 和 PP 平均浓度是雨强 1.67 mm·min⁻¹和 1.17 mm·min⁻¹的 2 倍,雨强 0.83 mm·min⁻¹的 3 倍;而 DP 平均浓度是雨强 0.83 mm·min⁻¹的 5 倍,可见,随着雨强的增加,雨滴对地表的打击和分散力增强,能加速蔬菜地 PP 的流失,同时也促进了 DP 的流失。

总之,不论是大雨强还是小雨强,由于试验土壤速效磷含量水平高(长期施用磷肥过多在土壤中大量积累造成的),并且在雨前施用了磷肥,所有试验区 TP、DP、DIP 和 PP 浓度都远大于水体富营养的警戒线,虽然在进入河道和最终进入库区会有所降低,但对水体的影响是不可忽视的。

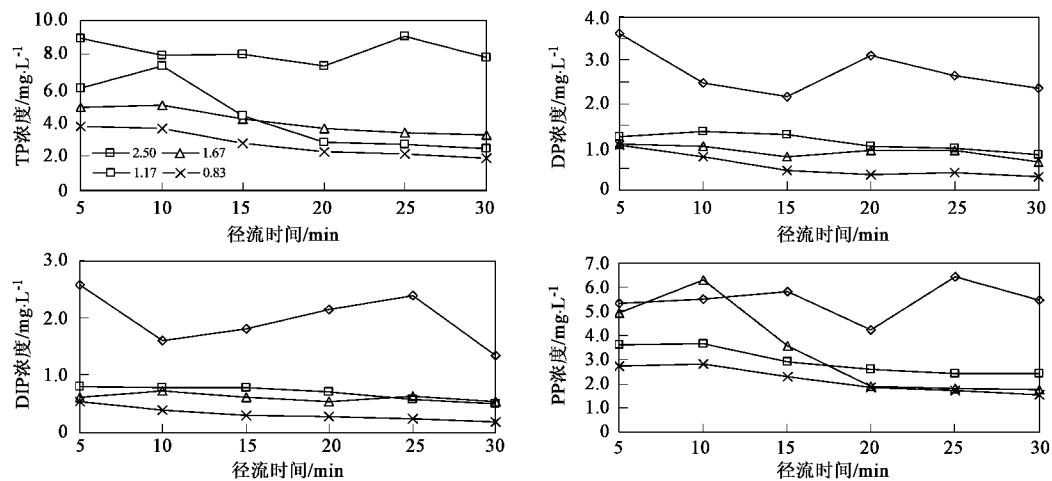


图 8 不同雨强下 TP、DP、DIP 和 PP 随径流的流失特性

Fig. 8 Characteristics of TP, DP, DIP and PP loss in runoff under different rainfall intensities

2.3 不同雨强径流中不同形态磷的平均流失速率

不同雨强径流中不同形态磷的平均流失速率可表示为:

$$v_i = \left(\sum_{i=1}^6 c_i \times Q_i \right) / (S_0 \times t_0)$$

式中, v_i 表示径流中不同形态磷的平均流失速率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$], c_i 表示各个时段的不同形态磷浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Q_i 表示各个时段的径流量 (L), S_0 表示有效降雨面积 (m^2), t_0 表示持续降雨时间 (min), 见表 2.

表 2 4 种雨强下不同形态磷的平均流失速率¹⁾

Table 2 Rates of different phosphorus loss in surface runoff under four rainfall intensities

雨强 / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	磷流失量/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$				颗粒磷 占总磷 比例/%
	总磷 (TP)	溶解点磷 (DP)	溶解无机磷 (DIP)	颗粒磷 (PP)	
2.50	5.13Aa	1.65Aa	1.21Aa	3.48Aa	68
1.67	0.50Bb	0.14Bb	0.09Bb	0.36Bb	72
1.17	0.49Bb	0.11Bb	0.08Bb	0.38Bb	78
0.83	0.25Cc	0.05Bb	0.03Bb	0.20Cc	80

1) 表中大、小写字母分别表示 0.01 和 0.05 的显著水平

在 30 min 有效降雨-径流的过程中, 雨强对土壤不同形态磷素的流失量有明显的影响. 就 TP 流失量而言, 当雨强从 0.83 增加到 $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, TP 流失量急剧增加, 从 0.25 增加到 $5.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$, 是 1.67 和 $1.17 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 9~10 倍, 并且是小雨强 $0.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 20 倍; 用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 如表 2 所示, 雨强 2.50、1.67、1.17 和 $0.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 对 TP 流失量的影响均达到了极显著水平, 而雨强 1.67 和 $1.17 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

差异不显著, 可能是由于试验田不够平整, 有积水坑, 致使这 2 种雨强的径流量的变化过程没有差异, 从而使得 TP 和 PP 流失量差异不显著. 不同雨强下 PP 流失速率占 TP 的 68%~80%, 其流失速率的变化规律与 TP 一致. 对比相关研究中有关 TP 流失速率的结果, 如表 3 所示, 本试验的 TP 流失速率与梁涛等^[23]的研究结果相一致, 但是低于其他研究者的结论^[24-27], 这可能有以下 2 方面的主要原因: 一是由于蔬菜地经常翻耕, 在降雨-径流过程中, 试验田不够平整, 多处有积水坑, 使得在 30 min 有效径流过程中, 累积径流量减少; 二是由于雨强太大, 容易产生沟渠, 形成优势流, 使得径流中不同形态磷素的浓度有所降低. 李国栋^[28]通过野外田间试验小区, 研究了太湖流域大浦镇蔬菜地在 2004-10~2005-08 为期 1 a 的 TP 径流流失量是 $14.7 \sim 64.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 这与本试验的结论较一致, 但是由此发现, 人工模拟降雨的试验结果大于天然降雨.

当雨强从 $0.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $2.50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, DP、DIP 流失速率的变化规律同 TP 一样, 也呈现大幅度的增加, 分别增加 33 倍、14 倍和 12 倍, 这说明随着雨强的增加, PP 流失速率增加的同时, DP 和 DIP 流失速率也在增加, 但是 DP 和 DIP 的流失速率增加的幅度较大, 由此可见, 随着降雨强度的增加, 雨滴对地表的打击和分散力增强, 能加速蔬菜地 PP 流失的同时, 促进 DP 和 DIP 的流失. 但是是一些研究结果认为^[29], 随着雨强的增加, PP 的流失量会显著增加, 但是对 DP 和 DIP 流失量的影响不是很大, 这主要原因可能是人工模拟降雨试验前表土喷施了磷肥, 显著增加了径流中 DP 和 DIP 的流失

表 3 比较相关研究中土壤不同形态磷平均流失速率
Table 3 Compared with soil phosphorus runoff loss of different forms in related researches

土地利用类型	研究方法	小区面积/m ²	降雨强度 /mm·min ⁻¹	降雨时间/min	TP 流失速率 /mg·(m ² ·min) ⁻¹	颗粒磷占 总磷比例/%	参考文献
菜地、玉米地等	模拟降雨	3	2	32 min	0.43 ~ 0.63	60% ~ 92%	梁涛等 ^[23]
旱耕地	模拟降雨	1	1.00	40 min	1.04 ~ 9.61	—	李配武 ^[24]
旱耕地	模拟降雨	13.5	1.06	90 min	5.87 ~ 7.86	86% ~ 89%	Tabbara ^[25]
施肥旱耕地	模拟降雨	32	0.42	4 mo	5.89 ~ 6.50	86% ~ 91%	Withers 等 ^[26]
旱耕地	模拟降雨	2	1.17	30 min	2.67	—	Kleinman 等 ^[27]

量.由此表明,在雨前施肥容易造成磷肥中无机态磷的损失.通过比较不同雨强下土壤磷素的流失量,可以发现土壤磷素的大量流失发生在大暴雨中.

3 结论

(1) 初始产流时间随雨强的增大呈幂函数减小 ($R^2 = 0.99$),径流量在雨强较小时,缓慢上升,但随着雨强的增大急剧上升.

(2) 同一雨强条件下,TP 和 PP 都表现为初始流失浓度较高,随降雨历时延长略有下降,最终趋于稳定,DP 变化比较平缓.

(3) 在整个降雨-径流过程中,PP 占 TP 68% ~ 80%,由此可见,PP 是土壤磷素流失的主要形态.

(4) 随着雨强的增加,不同形态磷的平均流失速率都在增加,但是雨强增加的幅度较大,这表明土壤磷素的大量流失主要发生在大暴雨中.

(5) 降雨前表土施磷肥,会促进磷肥中大量的无机态磷流失到水环境中,雨强越大,径流中溶解态磷的流失比例越高,而大部分溶解态磷可被水体中藻类直接吸收利用.所以,在暴雨易发期间,应调整农业活动的时间,采取适合的农业措施,尽可能避免降雨与频繁的农耕活动相遇,以减少蔬菜地土壤磷素的流失.

参考文献:

[1] 黄漪平.太湖水环境及其污染控制[M].北京:科学出版社,2001.199 ~ 217.
[2] 金相灿,叶春,颜昌宙,等.太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J].环境科学研究,1999,12(5):1 ~ 5.
[3] 曹志洪.施肥与水体环境质量-论施肥对环境的影响(2)[J].土壤,2003,35(5):353 ~ 363.
[4] Sharpley A N, Sims J T. Determining environmentally sound soil phosphorous level [J]. J Soil and Conservation, 1996, 51(2): 160 ~ 165.
[5] Sims J T. Phosphorous soil testing: Innovations for water quality protection [J]. Soil Sci Plant Anal, 1998, 29(14): 1471 ~ 1489.
[6] 郭亚芬,张忠学,许修宏.菜园土壤氮磷钾硫养分状况的研究[J].东北农业大学学报,1999,30(3):221 ~ 224.

[7] Foy R H, Dils R. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water[A]. In: Workshop paper abstracts & Poster papers[C]. Greenmount College of Agricultural and Horticulture, Northern Ireland, 1998. 16 ~ 19.
[8] Edwards A C, Withers P J A. Soil phosphorus management and water quality: A UK Perspective [J]. Soil Use and Management, 1998, 14: 124 ~ 130.
[9] 张乃明,余扬,洪波,等.滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J].环境科学,2003,24(3):155 ~ 157.
[10] 孙飞达,蒋志荣,王立.不同降雨强度下农地的产流产沙研究[J].甘肃科学学报,2005,17(1):53 ~ 56.
[11] 劳家柱.土壤农化分析手册[M].北京:农业出版社,1988.
[12] 陈文亮,唐克丽.SR 型野外人工模拟降雨装置[J].水土保持研究,2000,7(4):106 ~ 110.
[13] 王全九,沈晋,王文焰,等.降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移实验研究[J].水土保持学报,1993,7(1):11 ~ 17, 52.
[14] 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[J].农业工程学报,2006,22(6):39 ~ 44.
[15] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报,2004,(4):48 ~ 53.
[16] 张光辉,梁一民.黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J].水土保持学报,1995,9(3):78 ~ 83.
[17] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R. The transportation of bioavailable phosphorous in agriculture runoff [J]. J Environ Qual, 1992, 21: 30 ~ 35.
[18] 杨金玲,张甘霖.皖南低山丘陵地区流域氮磷径流输出特征[J].农村生态环境,2005,21(3):34 ~ 37.
[19] 华兆哲,朱晓青,王晓蓉.太湖沉积物磷释放对羊角月芽藻的生物可利用性研究[J].环境科学学报,2000,20(1):100 ~ 105.
[20] 王鹏.富营养化湖泊营养盐的来源及治理[J].水资源保护,2004,(2):9 ~ 12,69.
[21] 金相灿.中国湖泊富营养化[M].北京:中国环境科学出版社,1992.123 ~ 124.
[22] 梁涛,王浩,章申,等.西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征[J].环境科学,2003,24(2):35 ~ 40.
[23] 梁涛,王红萍,张秀梅,等.官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究[J].环境科学学报,2005,25(4):483 ~ 490.

[24] 李佩武. 将于径流过程中氮磷输出趋势分析[J]. 天津农业科学, 1994, (1): 7 ~ 10.

[25] Tabbara H. Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer[J]. J Environ Qual, 2003, 32: 1044 ~ 1052.

[26] Withers P J A, Breeze V G. Phosphorus transfer in runoff following application of fertilizer, manure and sewage sludge[J]. J Environ Qual, 2001, 30: 180 ~ 188.

[27] Kleinman P J A, Srinivasan M S, Curtis D, *et al.* Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff[J]. J Environ Qual, 2006, 35: 1248 ~ 1259.

[28] 李国栋. 太湖流域典型蔬菜地氮磷向水体迁移控制技术研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006. 27 ~ 28.

[29] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 37 ~ 40.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明.

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为. 自 2006 年 5 月 1 日起, 我们各刊在接受作者投稿时, 要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果, 文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊.

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前, 所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊.

我们将认真对待作者所作的上述承诺, 并建立信息共享机制, 对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动.

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任. 我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法, 并积极宣传和配合.

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部