

六叉河小流域农田土壤中磷下渗迁移过程研究

李 娜^{1,2}, 单保庆¹, 尹澄清¹, 韩海荣²

(1.中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2.北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083)

摘 要:选取我国东部江淮丘陵地区典型小流域——六叉河流域为实验区,以流域主要土地利用类型——旱地土壤为研究对象,原位监测了作物整个生长期中,不同磷肥条件下,磷在旱地壤中流中水平空间差异、时间动态与土壤垂直差异上的动态迁移规律。结果发现:在雨量丰沛、地下水位接近地表且土壤水分饱和度高的六叉河流域,旱地壤中流量丰富且流量变化与降雨分布具有高度的一致性和同步反应性。在 0.5 和 1 m 深处,壤中流中总磷(TP)浓度的平均值分别为 0.566 和 0.269 mg·L⁻¹,远远超出相邻水体(巢湖)中磷浓度的控制要求。在水平空间、垂直剖面以及时间动态上,不同磷肥处理条件下壤中流中磷的迁移量没有显著性差异($P<0.05$),说明与磷肥处理水平不相关。壤中流中 TP 和 PO₄-P 浓度同降雨特征(降雨量/频率)密切相关,雨期浓度低,而干旱期则相对较高。监测证实,在六叉河流域,由于土壤表层(0~1 m)中的磷含量较高,丰富的降雨-壤中流过程极易推动土壤磷传输。因此,除了地表径流传输控制外,如何有效抑制壤中流中的磷迁移对该区域水环境污染的治理十分关键。

关键词:旱地土壤; 非点源污染; 磷; 溶质迁移; 壤中流

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1132-07

Movement of P-Pollutant in an Agricultural Watershed in East China

LI Na^{1,2}, SHAN Bao-qing¹, YIN Cheng-qing¹, HAN Hai-rong²

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Collage of Environment and Resources, Beijing Forestry University, 100083, China)

Abstract: An experiment was conducted on a farmland in Liuchahe watershed, a typical agricultural watershed located on the north bank of Chaohu Lake (one of the most eutrophic lake in East China), to study the phosphorus movement in topsoil (0~1 m depth) with different phosphate treatment level. The results showed that due to high annual precipitation and groundwater level near ground, subsurface flow of the farmland topsoil in Liuchahe watershed was very plentiful, but the flow volumes changed quickly with daily precipitation intensity /process. The average concentrations of total phosphorus (TP) in the subsurface flow were: 0.566 mg·L⁻¹ (0.5 m) and 0.269 mg·L⁻¹ (1 m), respectively. TP and PO₄-P concentrations between treatments were no significance ($P<0.05$), and responded quickly with the precipitation conditions. The results suggested that due to long agricultural practices and a lot of fertilize used in recent years, the P-pollutants fate in the subsurface flow was not affected by the content of phosphorus in the topsoil but rainfall process in this region. Thus, besides the surface runoff, how to control P-transport in the subsurface flow may be another important way for increasing the water quality of Chaohu Lake.

Keywords: farmland soil; nonpoint source pollution; phosphorus; solute transport; subsurface flow

水体富营养化的原因及其过程十分复杂,国内外大量研究表明,源自流域农田中以磷、氮为代表的非

点源污染物过量输入是关键因素之一^[1-4]。能否有效控制非点源污染物质进入相邻水体已经成为水生态系统富营养化预防和治理的关键环节^[5]。在自然界中,磷的化学性质相对稳定,是影响淡水生态系统初级生产力的主要限制因子^[6-8],但是农业生产实践(主要是大量的磷肥投入)改变了流域磷的生物地球化学过程,导致大量的磷流失并进入水体,成为农业流域非点源

收稿日期:2005-02-21
基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412308);基金项目(40171003)
作者简介:李 娜(1979—),女,硕士生,主要从事水环境非点源污染控制及水陆生态系统界面过程的研究。
联系人:单保庆 E-mail:bqshan@mail.rcees.ac.cn

污染重点控制和管理的目标。

流域非点源污染物产生及迁移传输途径比较复杂,受降雨过程(降雨类型,强度及持续时间)和流域下垫面因素(地形、地貌、土壤的化学和物理状况、植被和作物特征以及农业实践措施等)的综合影响^[9,10]。非点源污染物同流域水文过程密切相关,一般而言,根据流域水文过程,非点源污染物的迁移传输途径有:地表径流、土壤壤中流和地下水传输过程^[11-13]。磷的化学性质相对氮素来说比较稳定,多以颗粒形态迁移进入河流和湖泊,因此长久以来,国内外对磷素迁移传输及其污染控制等机理研究多集中在降雨-地表径流传输上。但是,也有研究表明,在气候湿润、降雨相对丰沛的地区,土壤水分饱和度较高,地下水位接近地表,磷借助壤中流和地下水的传输比重明显提高。目前农田土壤中的磷通过淋溶输出进入江河湖泊并引发水质恶化,已受到广泛重视^[14],但是由于壤中流发生在土壤内部,其空间动态受土壤质地的影响,整个过程与传输机制尚不清楚^[15,16]。

在我国东部江淮丘陵地区,地形低缓,湖泊众多,受季风气候的影响,雨量丰沛,土壤水分饱和度高,土壤壤中流现象明显,非点源污染物借助壤中流传输的概率较高。考虑到我国东部地区湖泊水体富营养化十分严重,壤中流在污染物传输方面的机制与效应必须受到关注。但是,国内土壤磷的淋溶研究多以室内模拟研究为主^[17,18],缺少野外定量研究,尤其对于土壤壤中流磷迁移动态的流域野外原位监控实验研究在国内还尚未见过报道。因此,本文选取我国东部江淮丘陵地区典型农业流域为试验区域,以流域主要土地利用类型-旱地土壤为研究对象,原位监测了作物整个生长期中,不同施肥条件下,磷在流域水平空间与土壤垂直剖面上的流动特点及其时间动态变化规律。

1 材料与方法

1.1 流域特征

本次试验地六叉河流域位于安徽省巢湖北岸中庙附近,流域气候属于亚热带和暖温带季风气候,多年平均降水量 940 mm,年均温 16.1℃^[16]。流域邻接巢湖,区域内没有任何工业活动,是我国江淮丘陵区典型的农业生态系统和农业高产区。整个流域面积 691.6 hm²,村庄面积 49.6 hm²,占 7.2%;森林面积 108.7 hm²,比例为 15.7%;水塘系统面积 43.2 hm²,占 6.2%;旱地面积 177.8 hm²,比例为 25.7%;水稻田面积 312.3 hm²,占流域总面积 45.2%。主要土壤类型有

黄棕壤、黄褐土、水稻土、石灰岩土和紫色土零星分布,旱地土壤类型主要为黄褐土。悠久的农业耕种历史,使得流域农田系统内结构单调,景观类型相对较少,但破碎化程度极高^[15]。流域降雨受季风的影响多集中在夏季。本次原位监控试验就选在雨季,时间尺度以作物的整个生长季为准(4~7月),相应的降雨分布见图 1。

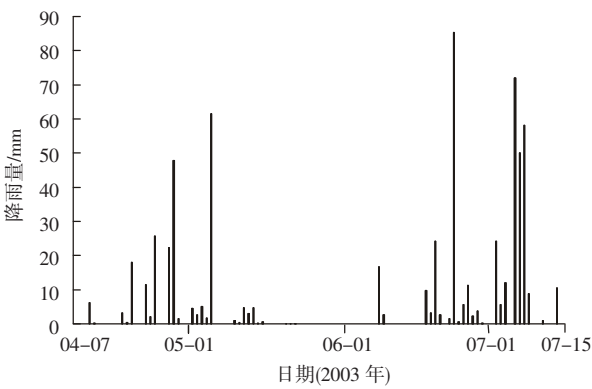


图 1 试验期内六叉河流域的日降雨量分布

Figure 1 The daily precipitation during experiment in Liuchahe watershed (04-07~07-15)

1.2 试验过程

六叉河流域地形低缓,为丘陵地貌,谷底和坡顶之间高差不大,处于 10~20 m 左右。土地利用相对简单,山坡为旱地,坡底和谷地为水稻田,中间间杂分布水塘,用来蓄水灌溉。本次试验于 2003 年 4 月中旬开始,以流域山坡旱地为对象,设置试验样地,样地坡度小于 5°,面积约为 1 000 m²。该样地的种植特点同流域其他同类型土壤一致,为一年二作制,即冬春种植油菜,夏秋种植蔬菜。试验研究前对流域旱地土壤进行了基底调查,共采集土样 12 个,取样深度 30 cm (以当地犁底层深度为准),分 2 层,其中试验控制区采集土样 6 个,其土壤理化性质见表 1。选取当地常见蔬菜西红柿作为供试植物。

为了比较壤中流中磷的水平空间迁移差异特征,在样地内设置 30 个样区,按照磷肥使用量,试验共分 6 个处理(含对照),每个处理 5 个重复,随机分布。样区面积 8 m²(4 m×2 m),样区之间间隔 2 m。肥料以当地常见的磷肥为主,间杂农家有机肥,肥料使用方式和时间处理一致(有机肥种植前 1 周使用,磷肥为底肥法,种植前一次性使用),不同处理的磷肥施用量见表 2。西红柿种植前测定各样区表层土壤(0~30 cm)有效磷的含量,从表中可见统计分析处理间没有显著性差异。

表 1 六叉河旱地土壤理化性质

Table 1 The soil properties of farmland in Liuchahe watershed

土壤类型	容重 /g · cm ⁻³	总孔隙度 /%	毛管孔隙度 /%	pH	全磷 /mg · kg ⁻¹	速效磷 /mg · kg ⁻¹	有机质 /%	含水量 /%
黄褐土	1.34	49.1	37.8	8.1	350	15	2.13	18.5

表 2 六叉河旱地土壤磷的处理水平

Table 2 Available phosphorus contents in the soils between treatments in Liuchahe watershed

处理	土壤有效磷背景值/mg · kg ⁻¹	施磷量/g
T1	14.9	20
T2	18.0	22
T3	16.4	25
T4	18.2	30
T5	19.4	38
CK	18.1	0

注:P<0.05 水平上有效磷背景值差异不显著(T 是 Treatment 的缩写); CK 为控制对照。

为了比较壤中流中磷在土壤垂直剖面的迁移差异,每个样区分别布设陶土管(suction cup)2 根,用来收集壤中流,根据该流域地下水深度(六叉河流域邻接巢湖,地下水位较浅,在 2 m 左右波动)和耕作层土壤深度(30 cm 左右)^[9],陶土管布设深度为 1 m 和 0.5 m,在样区内呈对角分布,两管间距 4 m。

出于反映壤中流中磷的时间动态变化目的,试验期从 4 月至 7 月贯穿整个西红柿生长季。西红柿种植时间为 4 月初,栽种 7 d 后第一次抽取壤中流水样,以后每隔 14 d 取样 1 次,一直持续西红柿生长季末为止,整个试验共计取水样 7 次。每次收集壤中流时,提前 24 h 对陶土管进行抽气,抽气时间为下午 6 点,次日下午 6 点采集水样,现场测定水量和相关指标(温度、pH 等)。试验分析在流域附近的野外试验站上进行。水样送回站上实验室后,立即预处理,贮存在 4℃ 冰箱中,于 48 h 内进行分析,分析指标为总磷(TP)、磷酸盐(PO₄-P)。

1.3 测定方法

所有测定均按照标准方法进行,磷酸盐(PO₄-P)的测定采用氯化亚锡还原光度法,总磷(TP)采用过硫酸盐氧化法来测定。具体方法参见《土壤农化分析手册》^[20]。统计分析采用 SPSS 软件进行。

2 结果与讨论

2.1 壤中流流量动态

图 2 是六叉河流域旱地土壤壤中流流量(陶土管抽气 24 h 后的水量)变化。从时间动态上看,试验监

控区中旱地土壤壤中流的流量过程规律基本一致,6 个处理之间水量的空间差异性很小。另外,从时间变化看 6 个处理的壤中流量都呈倒 S 形趋势,同监控研究过程中的降雨日分布趋势一致,见图 1,降雨频次和雨量决定土壤壤中流的水量变化,降雨分布与流量变化具有高度的一致性和同步反应性。从图 1 中可以看出,在整个试验阶段,前期(5 月上旬以前)和后期(6 月下旬至 7 月中旬)降雨频繁且降雨强度较大,相应的土壤壤中流流量较大。中期阶段降雨非常少且雨量很低,壤中流也相应的很少。

试验同时发现六叉河流域山坡旱地壤中流流量丰富且非常贴近地表,单位时间内(抽气取样间隔 24 h)6 个处理陶土管流出量在 0.5 m 和 1 m 处的均值范围分别为 5~90 mL 和 10~150 mL,见图 2。考虑到陶土管的管周(内管径 1.6 cm)面积很小,可以推导出在整个流域尺度上壤中流的发生量十分惊人。从垂直剖面上看,1 m 深处壤中流流量的变化趋势与 0.5 m 处很相似,但明显存在量的差别。随着土壤深度的递增,相应的壤中流量越丰富。根据已有研究文献,壤中流发生及变化过程的影响因素主要有土壤质地、当地降雨特点以及地下水位等^[19]。

上述结果的产生原因,一方面可能同当地地下水位较高(雨季 5~8 月距离地表约 2 m 左右)^[15],土壤水分饱和度高,另外也说明六叉河流域由于耕作实践(作物种植和耕作方式)特点相同,加上农业历史悠久,旱地土壤物理特征(土壤质地和空隙度等)比较一致^[15],在土壤质地比较均匀情况下,土壤水分在降雨、蒸发等气候因素影响下在空间梯度上的变化规律比较一致。从上述结果可以证实在降雨量丰沛、地下水位较高的六叉河流域,旱地土壤壤中流在雨季中非常容易发生。实验监控区壤中流空间差异很小及其与降雨的同步性响应现象,也可以推论在六叉河流域,流域壤中流流量过程的主要影响因子是年降雨量及其年内分布规律。考虑到六叉河流域是江淮区域比较典型的农业流域,其土地利用格局非常有代表性,因此该区域土壤壤中流过程及其产生的氮磷等营养盐要素迁移流动值得关注。

2.2 壤中流中磷浓度空间差异变化

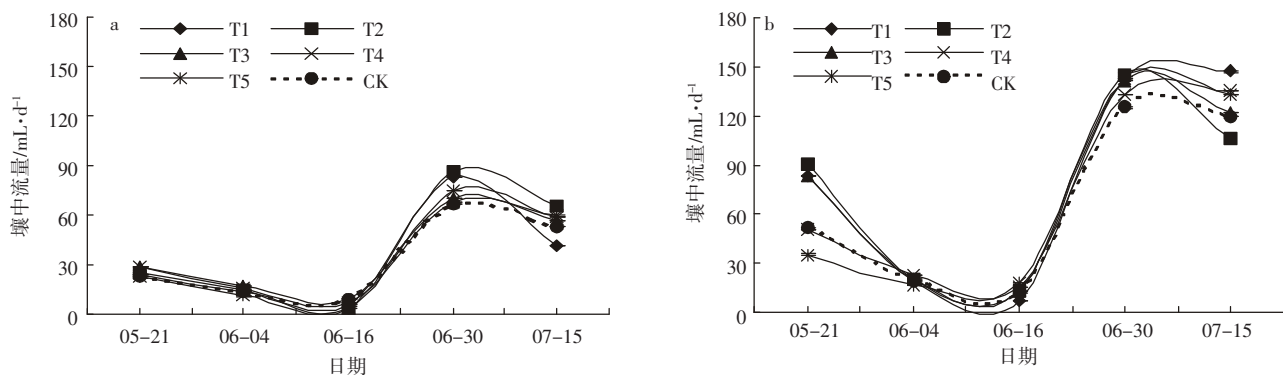


图2 旱地土壤中流流量动态(a:土壤深度 0.5 m; b:土壤深度 1 m)

Figure 2 The dynamic of subsurface flow volume in the soil (a: 0.5 m depth; b: 1 m depth)

基于上文壤中流与降雨过程分析,为了比较实验监控区不同处理之间施肥效应及其空间差异情况,根据取样前一周内降雨特点和雨量大小,分别选择以下3个降雨时期来分析磷浓度变化规律:5月1~7日(暴雨为主,最大日雨量65 mm,取样时间为5月7日)、5月15~21日(小雨为主,最大日雨量7 mm,取样时间为21日)、5月29日~6月4日(无雨,相对干旱,取样时间为6月4日)。

2.2.1 总磷(TP)

从图3可以看出,无论取样深度(1m或者0.5 m深)还是前期降雨条件如何,6个处理之间壤中流中TP浓度均无显著性差异。其中:1 m深处各个处理土壤壤中流TP浓度的变化范围:暴雨时期为0.098~0.418 mg·L⁻¹,小雨时期为0.178~0.850 mg·L⁻¹,无雨时

期则为0.159~0.362 mg·L⁻¹;0.5 m深处暴雨期小雨期和无雨期TP浓度的变化分别为0.278~0.704 mg·L⁻¹, 0.412~1.810 mg·L⁻¹, 0.294~0.591 mg·L⁻¹。这种情况说明不同磷肥处理下的壤中流中总磷的量,并不与施磷肥的多少有关。空间差异不显著,一方面同六叉河流域旱地土壤长期施用化肥有关,土壤溶液中的磷接近饱和,磷处理效应不明显。另外一个原因是当地降雨相对丰沛(多年平均降雨量940 mm),土壤水分饱和度高且地下水位贴近地表,使得壤中流中的磷吸附-解吸过程早已达到平衡。

传统观点认为土壤中的磷在垂直剖面上迁移比较困难,但本次试验发现,在六叉河流域,表层土壤壤中流中TP的迁移浓度较高,在0.5 m和1 m处TP的变化范围分别为0.186~1.810 mg·L⁻¹和0.051~0.849

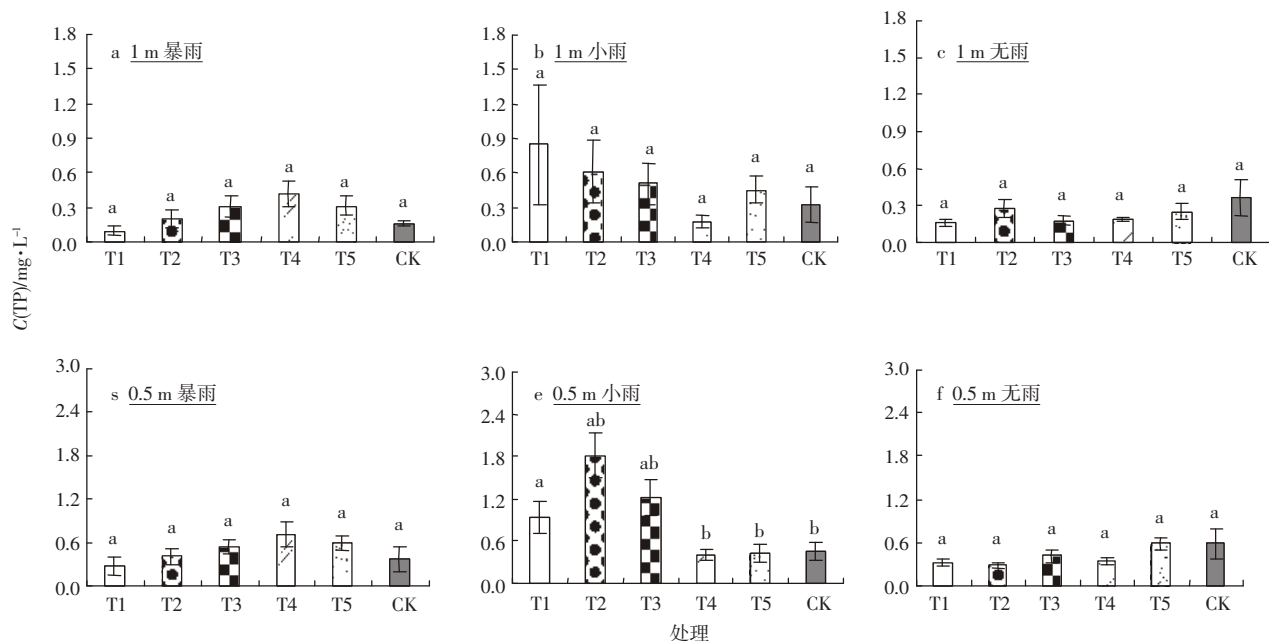


图3 不同雨型条件下壤中流TP浓度的空间差异

Figure 3 TP concentration variation in the subsurface flow under different precipitation conditions

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值分别是 0.566 和 $0.269 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远高于相邻水体巢湖水质控制要求。由于当地的地下水位非常接近地表(许多地方不足 2 m), 壤中流发生的时间长且流量丰沛, 土壤磷通过壤中流迁移进入地下水或直接流入巢湖的途径比较短, 这一结果意味着该地区旱地表层土壤中的磷有可能是相邻水体的一个巨大源库。

2.2.2 磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)

土壤磷迁移主要以溶解态磷酸盐为主, 从空间分

布上看, 六叉河流域旱地壤中流中磷酸盐浓度的变化动态同 TP 很相似, 对 3 种降雨条件下的空间差异比较可以看出, 不同磷处理之间大多数没有显著性差异, 见图 4 之 a、b、d、e。个别差异的出现在于旱期, 这可能同土壤水分蒸发有关, 见图 4 之 c、f。另外, 降雨差异引起的磷酸盐迁移差异在土壤剖面上比较明显, 1 m 深处磷酸盐浓度在雨期相对稳定, 但明显高于 0.5 m 壤中流中的浓度值。

2.3 壤中流中磷浓度的时间动态变化

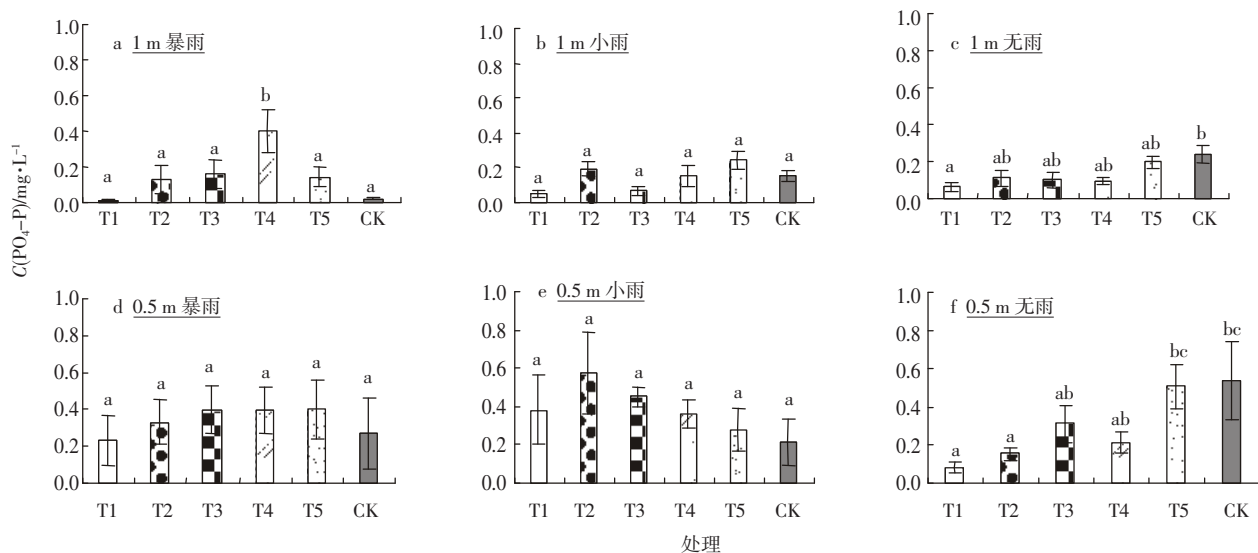


图 4 不同雨型条件下壤中流 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的空间差异

Figure 4 $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration variation in the subsurface flow under different precipitation conditions

2.3.1 总磷(TP)

图 5 是土壤壤中流中 TP 随时间变化趋势图。从图中可以看出, 各处理之间的变化趋势基本一致, 各处理 TP 浓度虽有波动差异, 但变幅没有显著的差异性(分析见 3.2)。相对高的 TP 峰值都出现在干旱期(5 月 21 日和 6 月 16 日), 江淮地区夏季土壤蒸发十分强烈, 干旱期表层土壤水分含量迅速下降, 土壤溶液养分浓度相应地增高。其他时间段(雨期)TP 浓度的波动值相对低, 壤中流中 TP 浓度的总体时相变化(无论是 0.5 m 还是 1 m) 都同降雨-壤中流过程相一致, 见图 5a。研究同时发现, 在不同磷肥处理水平下, 各处理 TP 浓度的时相波动趋势基本一致, 进一步说明六叉河流域旱地土壤由于长期耕作, 表层土壤磷已处于饱和状态, 磷肥效应不明显。土壤水分蒸发影响着土壤垂直剖面上的磷浓度变化, 这一点干旱时期特别明显, 见图 5b。 1 m 深处壤中流中 TP 浓度变幅在干旱期小于 0.5 m 处, 越靠近地表, 土壤水分越容易

蒸发丢失, TP 浓度则相应增高。

2.3.2 磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)

磷酸盐的时间动态变化与 TP 的变化趋势大体相似, 但波动幅度相对较小, 见图 6a。各处理间磷酸盐浓度的时间变化趋势基本相同, 这种现象再次证明六叉河流域旱地土壤溶液中溶解态磷已经饱和。此外, 1 m 深处壤中流中磷酸盐受干旱期蒸发作用影响比较小, 浓度曲线相对平缓, 见图 6b。

3 结论

(1) 六叉河流域雨量丰沛, 地下水位较高, 旱地壤中流流量非常丰富且贴近地表, 在 0.5 m 和 1 m 深处的壤中流流量的均值范围分别为 $5\sim 90 \text{ mL}$ 和 $10\sim 150 \text{ mL}$ 。壤中流流量与降雨日分布趋势一致, 呈波状分布。降雨频次和雨量决定壤中流的水量变化, 降雨分布与流量变化具有高度的一致性和同步反应性, 流域壤中流流量过程的主要影响因子是年降雨量及其年

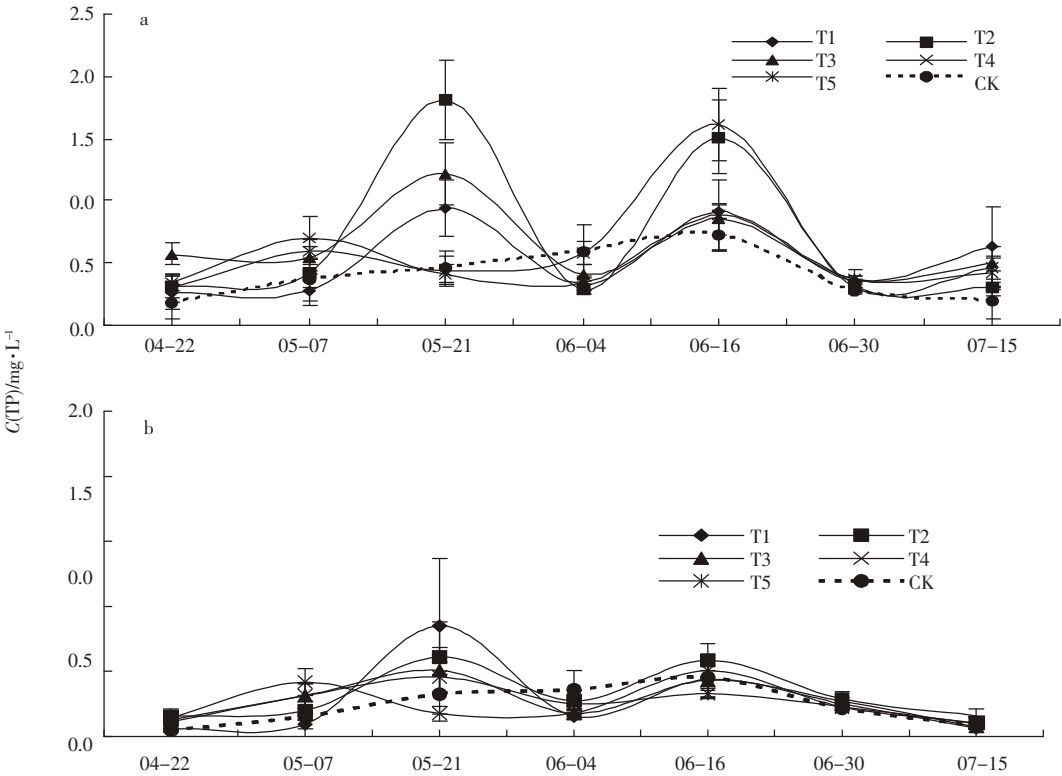


图 5 旱地土壤中流中 TP 浓度的时间动态变化(a :土壤深度 0.5 m; b:土壤深度 1 m)
Figure 5 TP concentration change in subsurface flow with time (a: 0.5 m depth; b: 1 m depth)

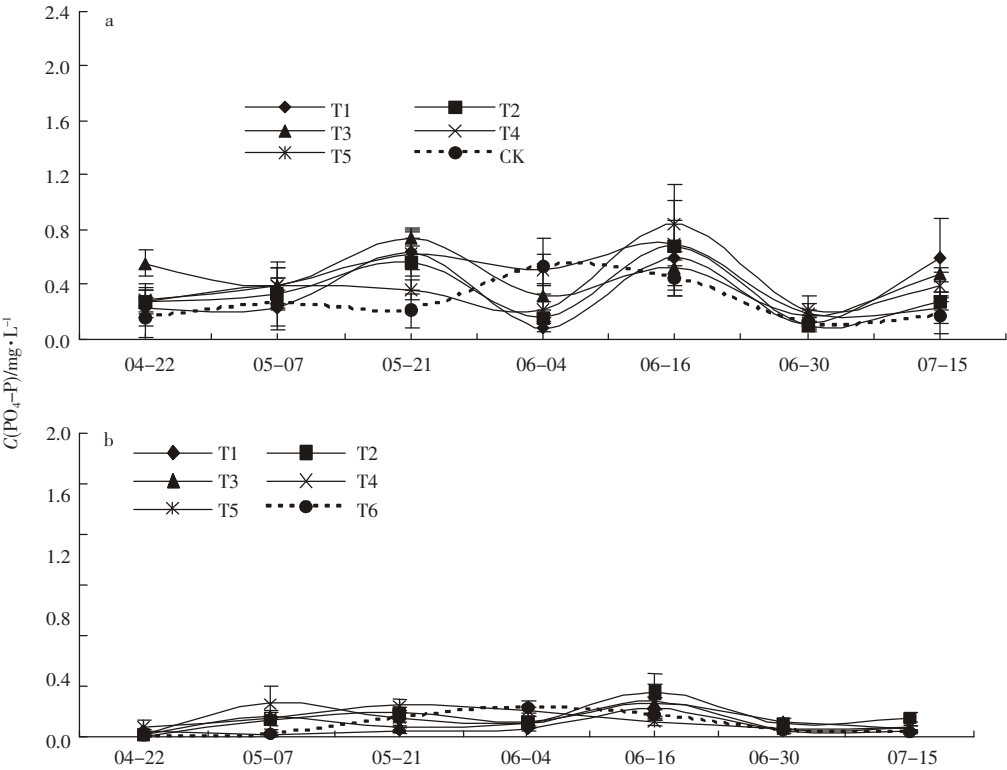


图 6 旱地土壤中流中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的时间动态变化 (a :土壤深度 0.5 m; b:土壤深度 1 m)
Figure 6 $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration change in subsurface flow with time (a: 0.5 m depth; b: 1 m depth)

内分布规律。

(2)壤中流中总磷与磷酸盐的浓度都很高,在 0.5 和 1 m 处总磷浓度的变化范围分别为 0.186~1.810 mg·L⁻¹ 和 0.051~0.849 mg·L⁻¹,平均值分别是 0.566 和 0.269 mg·L⁻¹,远远超出了水体中磷浓度的要求标准。土壤养分借助壤中流进入相邻收纳水体,可能是除了地表径流传输外的另一个很重要的方式。

(3)不同磷肥处理及降雨(暴雨期、小雨期和无雨)情况下,壤中流中磷在水平空间与土壤垂直差异流动的量,并不与肥料多少呈正相关,且绝大多数处理间的差异不显著。这种现象的产生可能是由于长期农业耕作及大量施加化肥,使得土壤中的磷已经处于接近饱和状态,肥料中磷的多少,不再对壤中流磷的动态变化产生显著影响。

(4)壤中流总磷浓度的总体时相变化动态(无论是 0.5 m 还是 1 m)都同降雨-壤中流过程相一致,相对高的总磷峰值都出现在干旱期,其他时间段总磷浓度的波动值相对较低且时相波动幅度不大。不同磷肥的处理间总磷和磷酸盐浓度都没有显著性差异,这可能和六叉河流域旱地土壤壤中流中磷的吸附-解吸过程已达到平衡有关。

参考文献:

[1] Ryding S, Rast W. The control of eutrophication of lakes and reservoirs [M]. Paris: The Parthenon Publishing Group, 1989.

[2] Klapper H. Control of eutrophication in inland waters [M]. New York: Ellis Horwood, 1991.

[3] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus eutrophication: a symposium overview [J]. *J Environ Qual*, 1998, 27:251-257.

[4] Yin C Q, Shan B Q. The multipond systems- A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution [J]. *Ambio*, 2001, 30(6): 369-375.

[5] Gburek W J, Sharply L, Healthwaite L. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index [J]. *J Environ Qual*, 2000, 29:130-144.

[6] Correll K L. Phosphorus: a rate limiting nutrient in surface water [J]. *Poultry Science*, 1999, 78:674-682.

[7] Richardson C J. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands [J]. *Science (Washington. DC)*, 1985, 228:1424-1427.

[8] Sharpley A W, Gburek W J. Agricultural phosphorus and water quality: sources transport and management [J]. *Agricultural and food science in Finland*, 1998, 7:297-314.

[9] Mitsch W J, Horne A J, Nairn R W. Nitrogen and phosphorus retention wetlands- ecological approaches to solving excess nutrient problems [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14:1-7.

[10] Casey R E, Taylor M D, Klaine S J. Mechanisms of nutrient attenuation in a subsurface flow riparian wetland [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30: 1732-1737.

[11] Gburek W J, Sharpley A N, Pionke H B. Identification of critical source areas for phosphorus export from agricultural catchments . Advances in hillslope processes volume I. UK: MG Anderson and SM. Brooks (eds). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1996.

[12] Kira T. Some aspects of ecological watershed management for the control of eutrophication [J]. *Water Resources Development*, 1988, 4(4): 259-269.

[13] Suling L Zhao. Tillage and nutrient source effects on surface and subsurface water quality at corn planting [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30: 998-1008.

[14] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2689-2701.

[15] 单保庆. 多水塘景观体系中磷污染物的传输迁移和能量流动过程 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2000. 5-6.

[16] Kronvang B R, Larsen S E, Svendsen L M. Non-point source nutrient losses to the aquatic environment in Denmark: impact of agriculture [J]. *Mar Freshwater Res*, 1995, 46:167-177.

[17] 王百群, 戴鸣均. 土壤不同形态氮素在剖面中移动特征的模拟研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 117-122.

[18] 姚建武, 艾绍英, 周修冲, 等. 热带亚热带多雨湿润区旱地土壤氮肥淋溶损失模拟研究[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 314-315.

[19] 单保庆, 尹澄清. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 17-12.

[20] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1998. 204-213, 229-275.