

西苕溪流域不同土地类型下磷素随暴雨径流的迁移特征

梁涛¹, 王浩³, 章申¹, 张秀梅¹, 于兴修² (1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 北京师范大学环境科学研究所, 北京 100875)

摘要: 选择太湖上游西苕溪流域最具代表性的 5 种土地类型, 利用野外人工降雨装置 (3 m²), 模拟天然大暴雨 (降雨强度 2 mm·min⁻¹), 研究了不同形态磷素随暴雨径流水相及沉积物相的迁移过程, 对比了流域内不同土地利用/土地覆被条件下磷素的迁移特征并估算流失速率。3 次平行实验结果表明, 在相同的降雨条件下, 地表径流中总磷的流失量桑林最大, 高出水田和松林的 5 倍。地表径流水相中的悬浮颗粒态磷占水相总磷的绝大部分, 溶解态磷的流失量菜地和桑林接近, 高于松林, 且远大于水田和竹林; 地表径流水相溶解态磷主要以溶解态无机磷的形式流失, 松林的流失量和流失速率远高于其他 4 种土地类型。各土地类型的地表径流沉积物相总磷流失量都随时间段的推移呈近似线性的下降趋势, 桑林、菜地和竹林的流失量相对较大, 松林最小。单位面积、表层 10cm 土壤的总磷流失量介于 2.57 ~ 4.89 g·m⁻², 地表径流水相总磷流失速率为 0.45 ~ 4.11 mg·(m²·min)⁻¹, 沉积物相高达 72.82 ~ 135.96 mg·(m²·min)⁻¹, 桑林流失速率最大, 松林最小。

关键词: 土地利用类型; 暴雨径流; 磷素流失; 人工降雨

中图分类号: S157, X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)02-06-0035

Characteristics of Phosphorous Losses in Surface Runoff and Sediment under Different Land Use in West Tiaoxi Catchment

Liang Tao¹, Wang Hao³, Zhang Shen¹, Zhang Xiu mei¹, Yu Xingxiu² (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Five typical land covers in West Tiaoxi catchment were studied on phosphorous loss in artificial rainstorm runoff. Triple duplication experiments were carried out under the artificial rain condition with intensity of 2 mm·min⁻¹ lasting 32 minutes in 3 m² plot. Transportation and flux of various species of phosphorous in runoff and sediments were investigated. The results showed that phosphorous losses amount and rate were different among five types of land covers. The loss of total phosphorous in runoff of mulberry garden was the largest, which was five times higher than that of paddy and pinery field. The majority of total phosphorous in runoff was particulate phosphorous. Losses of dissolved phosphorous in vegetable plots and mulberry gardens were much higher than bamboo plot and paddy field. Loss of dissolved inorganic phosphorous in runoff was the main part of dissolved phosphorus, which pinery was much higher than others. Total amounts of phosphorous loss from top 10cm layer of 5 kinds of soils were estimated as high as 2.57 ~ 4.89 g·m⁻², of which phosphorous loss through sediment of runoff accounted for more than 97%. The rate of total phosphorous losses were ranged in 0.45 ~ 4.11 mg·(m²·min)⁻¹ in runoff, which was much lower than that of 72.82 ~ 135.96 mg·(m²·min)⁻¹ in sediment of runoff.

Key words: land use types; surface runoff; phosphorous loss; artificial rainstorm

土地利用/土地覆被变化(Land Use/Cover Change, LUCC)通过影响区域中的物质循环和能量分配,对区域气候、土壤、水量和水质的影响极其深刻。研究 LUCC 对流域尺度上的元素

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-310-04-01); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410807)

作者简介: 梁涛(1970 ~), 男, 博士, 副研究员, 从事水环境生物地球化学研究工作。

收稿日期: 2002-04-01; 修订日期: 2002-06-26

输移过程及其通量的影响并定量评估其生态环境效应具有重要意义^[1],而其影响最主要表现在不同土地利用方式下营养盐随地表径流的迁移^[2].早在 20 世纪 60 年代末,农田土壤磷的流失就已开始受到关注^[3].大量研究表明,农田土壤中氮磷的流失是造成地表水体富营养化的决定性因素,尤其是农业高度集约、氮磷肥大量施用的农业集流区^[4].磷从农田土壤向地表水体的流失主要受降雨-径流的驱动,大部分以颗粒态磷形式流失^[5],且大量磷流失通常发生在大暴雨中^[6].作物覆盖度、坡度和雨强是影响径流量的最主要因素.覆盖度越低、坡度和雨强越大,径流量越大^[7].此外,不适当的土地利用方式和农田管理模式会导致土壤侵蚀和过量的氮磷随地表径流流失,从而形成对地表水的大面积非点源污染^[8].

从流域尺度研究磷随地表径流的流失是目前国内外研究的热点,在磷的来源^[9]、输入输出机制^[10]、影响因素^[11,12]、通量模型及估算^[13,14]以及调控措施^[15]方面已开展了有益的探索.合理的数学模型结合当地长期的监测数据通常被认为是最有效的研究手段,然而有关准确获取模型参数的工作仍然匮乏^[16].本研究基于野外模拟降雨实验,在忽略坡度和地表覆盖度等影

响因素的情况下,对比了太湖上游农业高度集约的西苕溪流域 5 种主要土地利用类型中不同形态磷素的流失特征并估算其流失速率,拟为建立降雨径流和河道营养盐输移模型提供基础参数.

1 材料和方法

1.1 模拟降雨装置系统

本研究使用的人工降雨模拟装置由供水的稳压桶、浮子流量计、喷雨器和集流槽等部件组成,降雨面积为 2 m × 1.5 m,装置图详见文献^[17].其中,喷雨器由 1.5 m 长带有塑料喷嘴的树脂管制作,可向上均匀喷出直径 0.7 mm 的雨滴.雨强由雨强调节器、浮子流量计控制.四周隔水板用于防止降雨泥沙溅出,降雨时产生的地表径流将通过集流槽收集并测定径流体积.与以往的野外人工降雨模拟装置相比,此装置具有面积小、降雨均匀、雨强易于控制、移动方便等特点,野外实验可进行多次重复,可有效减少实验误差.

1.2 实验设计与分析测定

根据西苕溪流域的土地利用现状,本研究选择了最具代表性的 5 种土地利用/土地覆被类型:竹林、桑园、松林、菜地、水田作为野外实验对象,其理化性状如表 1 所示.

表 1 实验点理化性状
Table 1 Physico-chemical characters of experimental location

样点	平均覆盖度 / %	平均坡度 / °	土壤类型	平均渗透深度 / cm	有机质含量 / %	土壤容重 / t · m ⁻³	含水量 / %	施肥情况 / kg · hm ⁻²
竹林	90	4.4	棕红壤	12	1.60	1.39	17.18	附加肥:300
桑园	100	7.0	黄红壤	20	1.47	1.40	10.02	磷肥:600;氮肥:900;
松林	100	13.8	黄红壤	3	3.48			不施肥
菜地	100	0	潮土	30	1.61	1.14	18.07	复合肥:300;磷肥:450
水田	100	0	水稻土		3.47	1.17	46.19	复合肥:900;氮肥:1500; 尿素:900

于 2001 年 9 月下旬在西苕溪流域典型样点(湖州市弁南镇目山村)开展了为期 2 天的野外人工模拟降雨试验.针对以上 5 种土地利用类型,分别开展 3 场平行降雨实验.实验雨强为 2 mm · min⁻¹,相当于当地大暴雨雨强水平.每

场降雨历时 32 min(不含产流时间).产流发生后每隔 4 min 采集 1 次径流样品(标号依次为 T1 ~ T8),停雨后搜集剩余径流样品(编号 T9),分别测量径流体积.采集的地表径流样品静置 3 h 后,取上清液 1000 mL 用于测定地表径

流中水相磷素含量(包括溶解态磷和悬浮颗粒态磷),同时收集径流沉积物,用于测定径流中沉积物相磷素含量.由于 T1 时段径流沉积物量很少,故将前 T1、T2 时段的径流沉积物合为 S1 段,以后时间段依次为 S2~S8.在每场降雨前后分别采集土壤样品,并以雨水样品作为空白对照.

测定项目包括:地表径流水相中的总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解态磷(DP)、溶解态有机磷(DOP)和溶解态无机磷(DIP);以及雨前、雨后土壤和沉积物相中的总磷.测定方法为:将径流水样分为 2 部分,一部分直接用于径流水相 TP 测定,采用过硫酸钾氧化、紫外分光光度法测定;另一部分经 0.45 μm 滤膜过滤,过滤水中的 TP 及 DP 与径流 TP 测定方法一致,DIP 采用钼蓝比色法测定;PP 和 DOP 用差减法计算得出.此外,各时段径流沉积物、雨前和雨后土壤样品首先进行自然风干、称重、消解,然后用等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定 TP 含量,并用中国标准中心提供的标样进行质量控制.

2 结果与讨论

由于地表径流的水相和沉积物相(即侵蚀泥沙)具有不同的磷携带能力,因此本研究从 2 个方面考察磷素随地表径流的迁移并计算各自的迁移速率.地表径流水相中的磷素主要是 DP 和 PP,而沉积物相中的磷素为吸附于泥沙的粗颗粒态.尽管降雨强度相同,但由于不同土地类型的坡度、地表覆盖度以及土壤理化类型存在差异,所以产流时间界于 2.5~10 min.对比 3 次平行实验的磷素含量分析结果表明,对于同一土地类型磷素含量的相对误差界于 6%~13%之间,为此,本研究以 3 场平行降雨实验所获数据的平均值为基础,对比产流开始后不同土地利用条件下,磷素随地表径流水相及沉积物相的迁移特征.

2.1 不同土地利用类型下各形态磷随地表径流水相的迁移特征对比

在整个人工降雨过程中,5 种不同土地类型的地表径流水相 TP 的流失过程既表现出相

似性,也存在明显差异,如图 1 所示.其共性在于各土地类型地表径流水相 TP 的含量均随时间段的推移呈现先快后慢的下降趋势.这反映了产流初始时土壤中 TP 含量最高并随后随径流迁移的过程.然而水相 TP 的流失量和流失速度不尽相同.桑林的水相 TP 流失量和流失速率均为最大,其次是竹林和菜地,松林和水田最小.桑林的水相 TP 流失总量比水田高 5 倍多.这反映了由于施肥强度的不同,土壤表层磷肥含量的差异对径流水相 TP 流失的影响.桑林每年的高强度施肥再加上一定的坡度是造成水相 TP 大量流失的最主要原因.而水田虽然也大量施肥,但其土壤持水量很高而且地势低平,因此 TP 不易随径流迁移.尽管松林的坡度很大(平均 10°以上),但由于基本不施肥,所以水相 TP 迁移量很低.由此看出,对于同一降雨强度和相似的植被覆盖度,不同土地利用类型代表了不同的施肥强度和耕作方式,其 TP 流失量和流失速率主要取决于土壤表层磷素的含量.

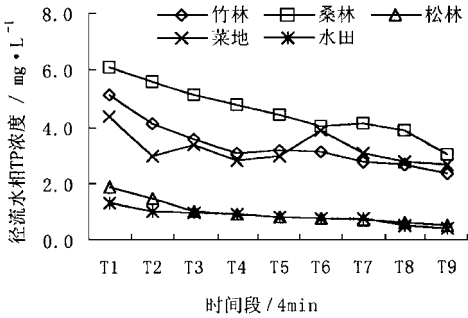


图 1 不同土地利用类型下径流水相 TP 迁移特征
Fig.1 Characteristics of TP loss in runoff under different land use

在暴雨径流作用下,磷从土壤向地表径流水相的迁移包括 DP 和 PP 2 个部分.DP 包括无机正磷酸盐、有机磷化合物和络合物,PP 包括全部的初级和次级矿物磷、有机磷以及吸附在细颗粒物上的磷.不同形态磷在径流水相中的迁移特征如图 2 所示.

从图 2 不难看出,无论哪种土地利用类型,PP 的迁移量都远高于 DP,高达水相总磷流失量的 88%~98%.可见 PP 是地表径流水相磷

流失的最主要形态,这与过去的研究结果一致^[5].由于 PP 占水相 TP 含量的绝大部分,因此不同土地利用类型下 PP 的流失过程与 TP 基本一致.而 DP 随土地利用类型的不同,流失特征与 PP 明显不同.除松林 DP 的流失速率较

大外,其他 4 种土地类型流失速率基本平稳.从 DP 总流失量上看,菜地和桑林接近,高于松林,且远大于水田和竹林.为进一步考察不同土地类型下溶解态磷的流失状况,图 3 对比了径流中水相 DOP 和 DIP 的流失过程.

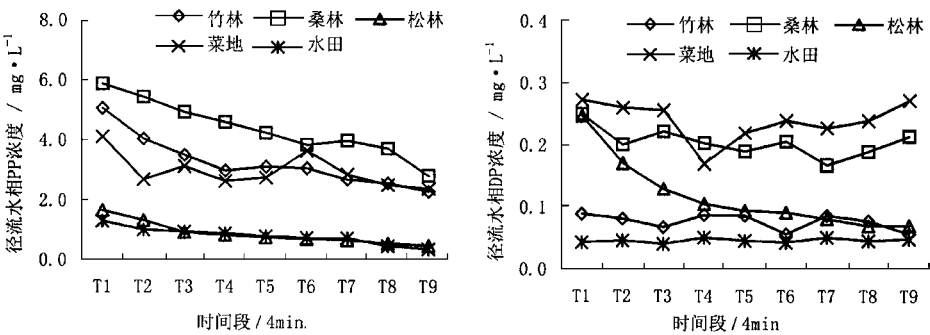


图 2 不同土地利用类型下径流中水相 PP 和 DP 迁移特征对比

Fig.2 Comparison of characteristics of DP and PP loss in runoff under different land use

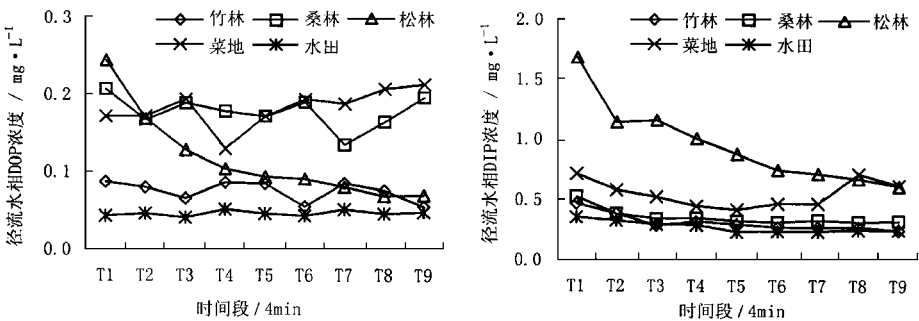


图 3 不同土地利用类型下径流水相 DIP 和 DOP 的迁移特征对比

Fig.3 Comparison of characteristics of DIP and DOP loss in runoff under different land use

DIP 是生物可直接利用的无机磷酸盐,它包括溶解反应磷(DRP)、 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} .从图 3 中可以看出,DIP 的流失量占 DP 流失量的绝大部分(76%~99%),且松林的 DIP 流失量和流失速率远高于其他 4 种土地类型.而相对比例较小的 DOP 的流失量对于不同土地类型表现出一定的差异,桑林、菜地和松林流失量较大,竹林和水田较小.DOP 的流失速率除松林较大外,其他土地类型变化均很小,这很可能是坡度在其中起到了主导作用.

从以上分析可以看出,地表径流水相磷的流失主要是 PP,这也是生物可利用磷的最主要

磷库.在 DP 中,DIP 的流失比例最大.不同的土地利用类型,各形态磷的流失总量和速率表现出不同的特征.

2.2 不同土地利用类型下土壤及径流沉积物相 TP 的迁移特征对比

通过计算可知,暴雨径流前后 5 种土地利用类型的土壤 TP 变化量介于 $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,土壤表层 10cm 以上 TP 变化量为 $2.57 \sim 4.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.同时从图 4(左图)可以看出,不同土地利用类型的雨前雨后土壤 TP 变化量依次为:桑林 > 水田 $\approx$ 菜地 > 竹林 $\approx$ 松林.

从图 4(右图)可以看出,不论哪种土地类型,径流沉积物相 TP 流失量都随时间段的推移呈近似线性的迅速下降趋势,这说明沉积物相 TP 的流失高峰发生在暴雨初期.桑林、菜地和水田的流失量相对较大,松林最小.由此推断,径流沉积物相磷的流失高峰发生在大暴雨初期,并占径流 TP 流失量的绝大部分.

2.3 不同土地利用类型下地表径流水相及沉积物相磷素流失率的估算

为进一步对比不同土地利用类型下地表径流不同相总磷的流失量,需要定量估算磷素在地表径流水相和沉积物相的流失速率.在降雨强度一定,忽略坡度、植被覆盖度影响的前提下,地

表径流 TP 流失量可以用径流流量、沉积物量和各相中 TP 含量估算出来,并按公式(1)估算出单位面积、单位时间不同土地类型下径流水相及沉积物相 TP 的平均流失速率.

$$v_i = \left| \sum_{t=1}^8 c_{ti} \times Q_{ti} \right| / (S_0 \times T_0) \quad (1)$$

式中, v_i 表示第 i 种土地利用类型下径流水相或沉积物相 TP 的平均流失速率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$]; c_{ti} 表示第 i 种土地利用类型的第 t 时段 ($t = 1 \dots 8$) 径流水相或沉积物相的 TP 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); Q_{ti} 表示第 i 种土地利用类型的第 t 时段的径流量或沉积物量 (L 或 g); S_0 表示有效降雨面积 (m^2); T_0 表示持续降

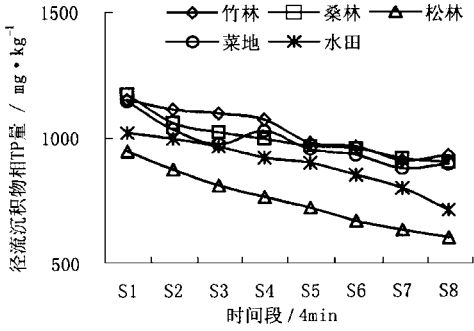
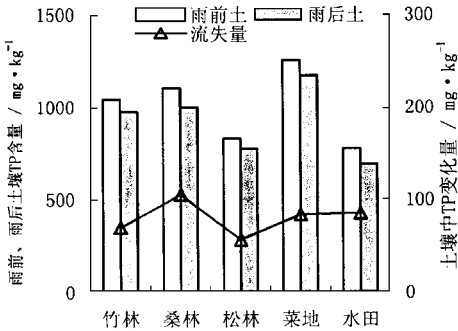


图 4 不同土地利用类型下土壤与径流沉积物相总磷的迁移通量对比

Fig. 4 Comparison of characteristics of TP loss in soil and sediment under different land use

雨时间 (min).

根据(1)分别计算了雨强 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 下不同土地类型地表径流水相及沉积物相磷素的流失率,以及水相 TP 流失量占沉积物相 TP 流失量的百分比.从图 5 可以看出,在 5 种被研究的土地类型中,磷随地表径流沉积物相迁移的平均速率桑林最大 [$135.96 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$],其次是竹林和水田[分别为 100.42 和 $113.88 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$],菜地和松林最小[分别为 95.83 和 $72.82 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$].与之相比,磷随地表径流水相的迁移速率很低,界于 $0.45 \sim 4.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 之间,仅占沉积物相迁移率的 $1\% \sim 3\%$,显然绝大部分磷是通过径流沉积物相从土壤流失的(97%以上).水相迁移量占沉积物相迁移量的比例以桑林最高,其次是竹林,松林、水田和菜地相近而且最低.

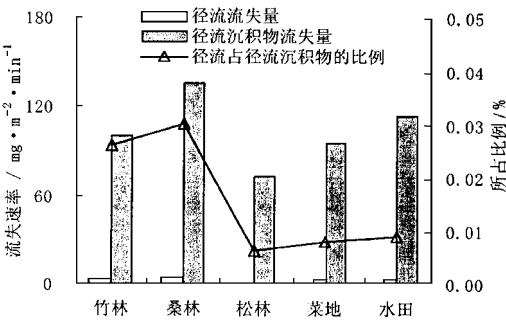


图 5 不同土地类型径流水相及沉积物相总磷迁移速率对比

Fig. 5 Comparison of TP loss rate in runoff and sediment under different land use

3 结论

- (1) 在相同降雨条件下,地表径流水相 TP 的流失量桑林最大,超过水田和松林的 5 倍.
- (2) 地表径流水相中的 PP 占水相 TP 的绝

大部分, DP 的流失量菜地和桑林接近, 高于松林, 且远大于水田和竹林. 水相 DIP 的流失量占 DP 流失量的绝大部分, 松林的流失量和流失速率远高于其他 4 种土地类型.

(3) 各土地类型的地表径流沉积物相 TP 流失量都随时间段的推移呈近似线性的下降趋势, 桑林、菜地和竹林的流失量相对较大, 松林最小. 单位面积、表层 10cm 土壤的总磷流失量介于 $2.57 \sim 4.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

(4) 不同土地类型的 TP 流失速率以桑林最大, 松林最小. 地表径流水相 TP 流失速率仅为 $0.45 \sim 4.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$, 而沉积物相 TP 流失速率高达 $72.82 \sim 135.96 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$.

参考文献:

1 郭旭东, 陈利顶, 傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 66 ~ 75.

2 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 傅伯杰. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506 ~ 510.

3 Olness A E, Smith S J et al. Nutrient and sediment discharge from agricultural watersheds in Oklahoma[J]. J. Environ. Qual., 1975, 4: 331 ~ 336.

4 Sharpley A N, Menzel R G. The impact of soil and fertilizer phosphorous on the environment[J]. Adv. Agron., 1987, 41: 297 ~ 324.

5 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.

6 Schuman GE, Spomer R G, Piest RF. Phosphorous losses from four agricultural watersheds on Missouri Valley Loess

[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1973, 37: 424 ~ 427.

7 Steegen, Govers G, Takken I et al. Factors controlling sediment and phosphorous export from two Belgian agricultural catchments[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 1249 ~ 1258.

8 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 98 ~ 100.

9 Sharpley A N, Gburek W J et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania[J]. Agric. Water Manage., 1999, 41: 77 ~ 89.

10 McDowell R W, Sharpley A N, Folmar G. Phosphorus export from an agricultural watershed: linking source and transport mechanisms[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 1587 ~ 1595.

11 Mander U, Kull A et al. Nutrient runoff dynamics in a rural catchment: Influence of land-use changes, climatic fluctuations and ecotechnological measures[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 405 ~ 417.

12 陈欣, 范兴海, 李东. 丘陵地地表径流中磷的形态及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2000, 20(3): 284 ~ 288.

13 Walter M T, Parlange J Y et al. Modeling pollutant release from a surface source during rainfall runoff[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 151 ~ 159.

14 McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 508 ~ 520.

15 Heathwaite L, Sharpley A N. Evaluating measures to control the impact of agricultural phosphorus on water quality[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 39: 149 ~ 155.

16 朱萱, 鲁纪行, 边金钟等. 农田径流非点源污染特征及负荷定量化方法探讨[J]. 环境科学, 1985, 6(5): 6 ~ 11.

17 梁涛, 张秀梅, 章申等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 389 ~ 396.