

天然降雨下红壤坡地氮磷流失过程与特征分析

奚同行¹, 左长清², 王伟³, 王昭艳²

(1. 江西省水土保持科学研究所, 江西 南昌 330029; 2. 水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 山东省烟台市莱山区水利局, 山东 烟台 264003)

摘要: 利用江西省水土保持生态科技园的野外实测资料, 对天然降雨条件下南方红壤区自然坡面的氮磷流失过程与特征进行了分析。结果表明, 在自然条件下, 由于降雨强度的时间变化不稳定, 且不连续, 自然坡面产流—产沙过程也是不稳定和不连续的, 呈现出一峰或多峰的特性; 同一场降雨下自然坡面的产沙过程与产流过程基本一致, 累积产沙量和累积径流量随时间的延长呈现出先小幅增长后快速增加, 最后趋于平稳的变化趋势。坡面径流中总磷的输出浓度始终小于总氮输出浓度, 且总磷变化稳定, 总氮波动较大; 侵蚀泥沙中均存在养分富集现象, 且总氮富集比要小于总磷富集比。

关键词: 土壤侵蚀; 氮磷流失; 天然降雨; 红壤坡地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0136-05

中图分类号: S157.1

Processes and Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses on Red-soil Sloping Land Under Natural Rainfall

XI Tong-hang¹, ZUO Chang-qing², WANG Wei³, WANG Zhao-yan²

(1. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 2. Research Centre of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 1000048, China; 3. Laishan Bureau of Water Resources, Yantai, Shandong 264003, China)

Abstract: In order to study nitrogen and phosphorus losses on red-soil sloping land, field experiments under three typical natural rain events were performed to investigate the N and P transferring processes and their characteristics in the SWC Ecological Science and Technology Demonstration Park of Jiangxi Province. Results showed that under the condition of natural rainfall, the processes of runoff and sediment on natural slope were not stable and continuous and had one or more peak values, because rainfall intensity was not stable and continuous. The processes of runoff and sediment on natural slope were basically the same for the same rainfall event. The cumulative sediment yield and cumulative runoff with time showed a slight growth and then a rapid growth, and tend to change smoothly. The concentration of phosphorus was lower than that of nitrogen, and changes in P concentration were more stable than those in N concentration. There were nutrition enrichments in eroded sediment, and the N enrichment ratio was lower than the P enrichment ratio under the three rain events.

Keywords: soil erosion; N and P loss; natural rainfall; red-soil sloping land

土壤侵蚀过程造成的氮磷流失是导致农业面源污染、河流湖泊等地表水体产生富营养化的主要原因, 其带来的环境、经济及社会问题已引起国内外普遍关注。自 20 世纪 60 年代以来, 国外对坡耕地、林地、草地等不同土地利用方式下的养分流失状况进行

了大量的研究, 主要集中在各种形态的 N、P 养分流失, 在控制养分流失方面多限于水沙流失效应, 并指出了坡耕地的氮、磷流失是湖泊和河流富营养化的直接原因^[1-6]。我国有许多针对不同类型土壤氮磷地表径流流失机理与规律的研究报道和经验成果^[7-19]。

收稿日期: 2012-02-29

修回日期: 2012-04-10

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“水蚀地区坡面水土流失阻控技术研究”(200901047); 国家“十一五”科技支撑项目“闽西中高丘陵区红壤侵蚀快速治理与生态农业技术集成示范”(2009BAD6B06)

作者简介: 奚同行(1968—), 男(汉族), 江西省南康市人, 高级工程师, 研究方向为土壤侵蚀与流域治理、生产建设项目水土流失防治。E-mail: Tonghangxi@163.com。

通信作者: 左长清(1956—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水土保持和农业工程研究。E-mail: zuochq@sina.com.cn。

总体上,国内研究多在人工模拟降雨条件下开展,且多集中在西北黄土区和四川紫色土区,而对南方红壤区的研究还显不足。由于在室内人工均匀降雨条件下所得的产流规律不能完全解释天然降雨条件下的产流规律,因此对天然降雨条件下南方红壤区氮磷流失规律的研究还有待探究。

本文试图以典型的南方红壤坡地为研究对象,对天然降雨条件下氮磷流失过程及其特征进行分析研究,从而为控制水土流失和防止面源污染,合理利用南方红壤资源,解决农业生产与环境问题提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在江西省水土保持生态科技园内进行,该科技园是我国南方红壤的中心分布区域,具有典型代表意义。园区地理坐标为东经 $115^{\circ}42'38''$ — $115^{\circ}43'06''$,北纬 $29^{\circ}16'37''$ — $29^{\circ}17'40''$,属于亚热带季风气候,多年平均降雨量 $1\ 350.9$ mm,多年平均气温 16.7 °C,年日照时数 $1\ 650\sim 2\ 100$ h,多年平均无霜期 249 d。成土母质以第四纪红色黏土为主,地貌为浅丘岗地,海拔在 $30\sim 100$ m,坡度多在 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。地带性植被为亚热带常绿阔叶林。

1.2 试验设计

试验小区布设在 12° 自然裸露坡面上,东西坡向,垂直投影面积 $5\text{ m}\times 20\text{ m}$ (宽 \times 长)。为阻止地表径流进出小区,小区四周均设有围埂,围埂高出地表 30 cm,埋深 45 cm,用混凝土砖块砌成。小区下方设有矩形集水槽及径流池,以承接小区径流泥沙。径流池根据当地可能发生的最大暴雨的径流量设计成 A、B、C 这 3 种形式,均按 $1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 深)方柱形修筑。A、B 两池在墙壁两侧装有五分法 60° 的三角形分流堰,其中 A 池 4 份排出,内侧 1 份流入 B 池。B 池与 A 池一样,其中 1 份进入 C 池。径流池进行了率定,池壁安装有搪瓷水尺以观测水位。另外,试验小区旁还设置气象观测站 1 座。

1.3 试验方法

试验设计安排时间在 2006 年 5 月至 2007 年 4 月,选取了 3 场具有代表性的典型性降雨(表 1)来研究不同降雨条件下红壤坡地的氮磷流失过程与特征。在各场降雨之前均取表层土壤进行氮磷损失对照研究,降雨产流后对各时段产流水样进行氮磷养分浓度分析,并对次降雨下的降雨量、径流量及侵蚀泥沙量进行观测与计算。

表 1 试验区典型降雨特征

降雨日期	降雨量/ mm	降雨历 时/min	平均雨强/ (mm \cdot h $^{-1}$)	降雨属性
20060624	22.9	80	17.18	连续性短历时
20070317	12.1	530	1.37	间隙性长历时
20070307	5.0	400	0.75	间隙性长历时

(1) 土壤样品采集。按 S 型取 5 个点,每个点取表层(0—20 cm)土壤 300 g,共取土样 15 个,用 4 分法取混合样装入保鲜袋,测定雨前表土总 N 和总 P。

(2) 径流样品采集。产流开始后,记录初始产流时间,每隔若干分钟从径流池中取一次径流水样,每次取 500 ml,测定降雨过程中总 N 和总 P。采集的地表径流样品静置 3 h 后,取上清液 150 ml 过滤后用于测定地表径流中 N、P 元素含量。沉积泥沙自然风干后,用于泥沙中全 N 和全 P 的测定。

1.4 测定项目与方法

(1) 降雨量、径流量及侵蚀泥沙量。通过气象观测站中的虹吸式自记雨量计,记录次降雨过程和降雨量。径流量可据径流池中水尺的读数由试验站预先率定的公式计算,侵蚀泥沙量通过烘干法测定含沙水样计算。

(2) 土壤化学性质。主要测定全 N 和全 P,其中全 N 采用开氏消煮法,全 P 采用钼锑抗比色法。

(3) 径流养分测定。主要测定全 N 和全 P,其中全 N 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法,全 P 采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法。

2 结果与讨论

2.1 不同降雨条件下氮磷流失过程

土壤表层溶质随地表径流迁移是一个十分复杂的过程,受到众多因素的影响,但是直接决定因素是化学元素、土体和水三者^[20]。其中水不仅使土壤溶质随径流水迁移,而且使溶质随侵蚀泥沙迁移。因此,降雨条件下的产流—产沙是坡面养分流失的重要过程。由于 20070307 降雨属于小雨型,坡面产流缓慢,产流量很小,难以分时段分析养分流失的过程变化规律,故本文关于不同降雨条件下氮磷流失过程的研究,仅对 20060624 和 20070317 这 2 场降雨的情况进行了分析。

2.1.1 产流—产沙过程 从图 1—2 中可看出,不同降雨下自然坡面地表产流—产沙过程有如下特征^[21]: (1) 在自然条件下降雨过程是不稳定和不连续的,直接导致产流产沙过程也是不稳定和不连续的,如 20070317 降雨条件下产流产沙过程呈现出多峰多谷的现象。(2) 同一场降雨下自然坡面的产沙过程与产流过程基本一致。降雨开始后坡面出现产

流的同时,坡面产沙也就开始;从降雨开始,雨强迅速增大,坡面产流率和产沙率也都同时迅速增大,产流率达到峰值时,产沙率也基本于相同时刻或稍后时刻达到最大值;随着雨强呈波动状逐渐减小,坡面产流率和产沙率也都降低;最后,坡面产沙随着产流结束而停止。(3)坡面累积产沙量和累积产流量随时间延长呈现出先小幅增长后快速增加最后趋于平稳的变化,构成了一个包含发育期、活跃期和稳定期 3 个阶段的产流产沙过程。发育期内,产流量较小,产沙量和产沙速率相对缓慢;活跃期内,产流量较大,产沙量和产沙速率明显增大;稳定期内,产流量增加至一定数值后达到稳定,产沙量和产沙速率也趋于稳定状态。这与朱智勇等^[22]研究结论一致。受间歇性长历时降雨雨型特征的影响,在 20070317 降雨条件下,坡面产流产沙出现 2 次产流产沙的现象。

雨条件下最大产流速率(0.034 mm/min)的 10 余倍;前者平均产流速率(0.187 mm/min)也显著大于后者(0.007 mm/min),相差约 26 倍。产沙速率和产流速率类似,表现为 20060624 明显大于 20070317,这显然与 20060624 降雨的雨量、雨强高等降雨特性有关。从滞后时间来看,20060624 降雨下自然坡面产流滞后降雨时间不足 1 min,而 20070317 降雨下坡面产流之后降雨时间超过 39 min;20060624 降雨条件下坡面产沙峰值与产流峰值几乎同时出现,而 20070317 降雨条件下坡面产沙峰值滞后产流峰值时间约达 10 min。可见,产流滞后时间和产沙峰现滞后时间随雨强减小而增大。通常坡面径流产生时间快慢主要取决于两个因素:一是坡面平均土壤入渗率与降雨强度大小,二是土壤表面积水势能大小(坡度大小)。在土壤、地形等不变(即土壤入渗率和坡度坡长恒定),仅降雨变化的条件下,与雨强小的降雨相比,通常雨强高的降雨入渗至土壤的雨水相对较少,坡面更容易产生径流,故其产流滞后降雨的时间较短。

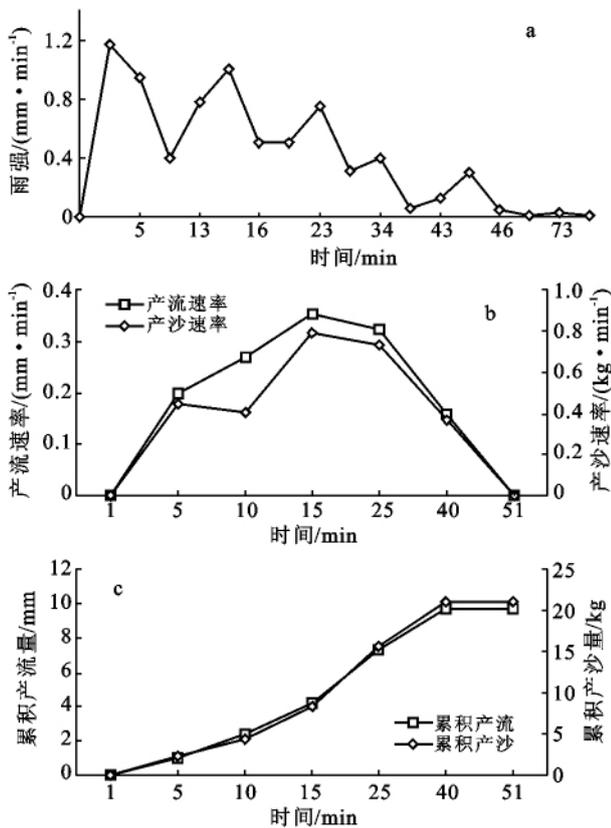


图 1 20060624 降雨—产流—产沙过程曲线

不同降雨条件下产流—产沙过程有明显差异(表 2)。从产流速率来看,20060624 降雨条件下自然坡面最大产流速率为 0.354 mm/min,是 20070317 降

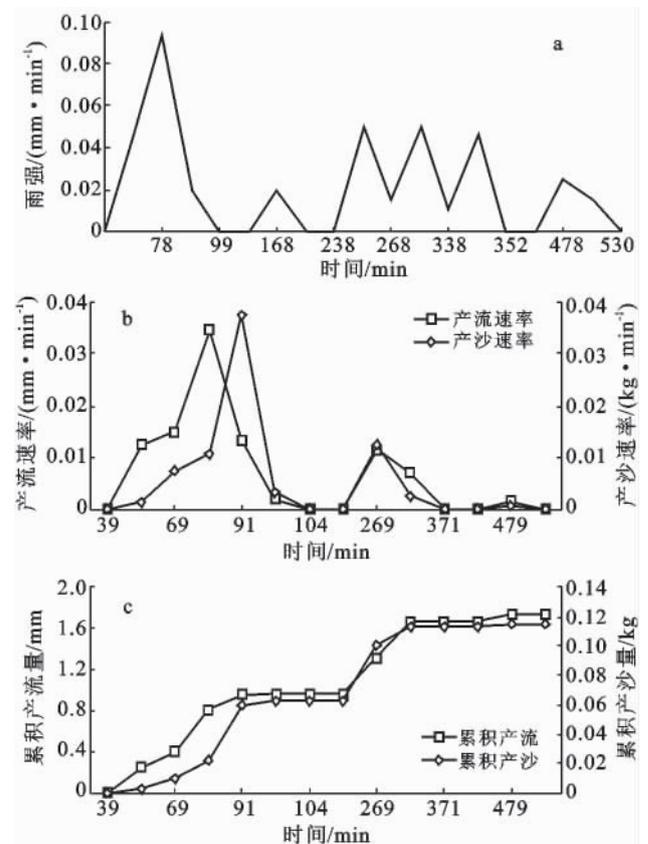


图 2 20070317 降雨—产流—产沙过程曲线

表 2 典型降雨下产流—产沙特征

降雨日期	最大产流率/ (mm·min ⁻¹)	平均产流速率/ (mm·min ⁻¹)	最大产沙率/ (kg·min ⁻¹)	平均产沙速率/ (kg·min ⁻¹)	产流滞后降 雨时间/min	产沙峰值滞后 产流峰值时间/min
20060624	0.354	0.187	0.790	0.550	1	0
20070317	0.034	0.007	0.038	0.006	39	10

2.1.2 氮磷流失过程 图 3 为不同降雨下自然坡面径流过程中全 N 和全 P 的浓度变化。从图 3 中可以看出,产流初期坡面径流中的养分浓度均有升高的趋势,之后有较大幅度的下降,最后趋于稳定。径流初期输出浓度大且变化剧烈,显然是由于雨前土壤中养分积累较多,水流冲蚀较大。养分浓度随着产流时间的延长总体上呈下降的趋势,径流中养分浓度变化主要集中在产流前期,而后期则均匀稳定,这与马琨

等^[14],王晓龙等^[17],傅涛^[14,17,23]在人工降雨条件下所得的结论基本一致。

一般认为初始产流时,土壤黏粒含量较高,吸附于表层颗粒和存在于土壤液相中养分浓度相对较高,坡面径流的稀释溶解作用较强,浓度相应较高。随着降雨的持续,表层土壤养分不断地被雨水淋洗到土层深处或随径流、泥沙迁移,径流养分浓度逐渐降低并趋于稳定^[10,24]。

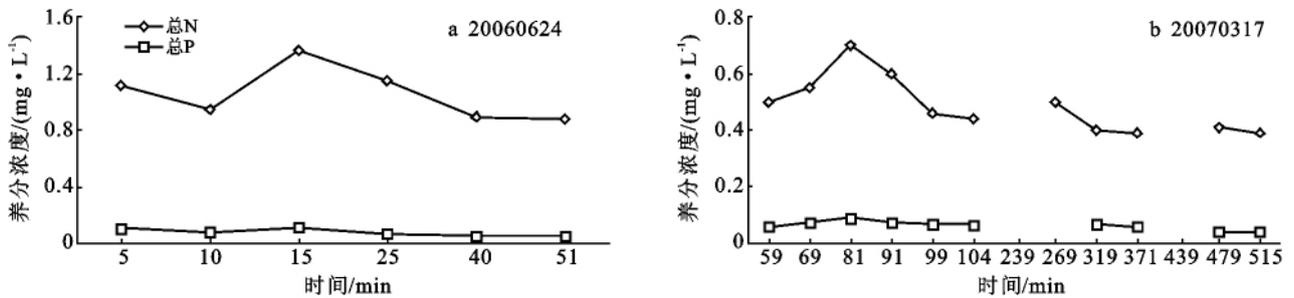


图 3 典型降雨下总氮和总磷输出浓度过程曲线

从养分类型来看,20060624 降雨条件下径流总氮、总磷初始浓度分别为 1.12 mg/L 和 0.11 mg/L,后期分别稳定在 0.88 和 0.06 mg/L 左右,可见总磷浓度始终要小于总氮浓度,而 20070317 降雨条件下也表现出这一特征,这可能与土壤表层总氮含量较高而总磷含量较低有关。此外,这 2 场降雨下总氮浓度波动较大,而总磷浓度变化较稳定,这可能是因为在土壤中易被固定,不易转移,故总磷浓度波动较小。

由于径流和泥沙运移的联合作用,径流中养分含量随降雨量和径流量而变化。20060624 降雨下全 N 和全 P 的初始浓度分别是 20070317 降雨下养分初始浓度的 2.24 和 1.50 倍;前者的后期稳定浓度依次是后者的 2.26 和 1.44 倍。可见,20060624 降雨下养分输出浓度高于 20070317 降雨下养分输出浓度。这可能是因为相对 20070317 降雨而言,20060624 降雨历时短而强度大,容易造成较大的径流量,其土壤颗粒表面吸附的养分离子大量析出所致。

2.2 不同降雨条件下氮磷流失特征

土壤氮磷流失过程实质是表层土壤与降雨、径流的相互作用过程,降雨和径流是土壤养分迁移的主要动力,土壤是相互作用的界面和溶质迁移的“母体”。因此,一个完整的土壤养分流失过程不仅包括降雨—产流—产沙过程,还包括养分动态变化过程^[20],即侵蚀坡面的表土被降雨剥离和搬运,其养分含量也随之发生变化。

2.2.1 氮磷流失量 表 3 是 3 场天然降雨条件下的养分流失总量。从表 3 可以看出,红壤地区自然坡面的养分流失量中总氮明显高于总磷,这与径流中总氮输出浓度远大于总磷输出浓度相一致。随着雨量、雨强变小,氮、磷流失量明显降低。此外,泥沙携带量(E_S)与径流携带量(E_R)的比值(E_S/E_R)变化范围为 1.52~5.20,均大于 1,说明 3 场降雨下不同养分流失量均以泥沙携带为主。也就是说,土壤中 N、P 流失量的大小主要受到泥沙流失量的约束,其流失形态主要为泥沙结合态。

表 3 降雨条件下土壤养分流失总量

mg

降雨日期	总氮流失量				总磷流失量			
	E_S	E_R	E_S/E_R	总流失量	E_S	E_R	E_S/E_R	总流失量
20060624	2 118	875	2.42	2 993	311	61	5.10	372
20070317	144	93	1.55	237	26	5	5.20	31
20070307	94	62	1.52	156	18	4	4.50	22

2.2.2 养分流失富集比 通过对侵蚀泥沙中养分含量与雨前表层土壤养分含量的比较,发现泥沙中的各种养分浓度均高于表层土壤养分含量,说明流失的养分在侵蚀泥沙中发生富集。用富集比(流失泥沙样中

养分含量与雨前表层土壤样的养分含量之比)来说明流失泥沙对养分的富集特征(表 4)。从表 4 中可以看出,富集比的变化范围为 1.11~1.57,均大于 1,说明 3 场降雨下侵蚀泥沙养分含量普遍高于原表土养分

含量。从不同形态养分富集率来看,总氮、总磷的平均富集比分别为 1.30,1.41,即总氮富集比要小于总

磷的富集比,这与氮、磷在土壤中移动的化学行为不同有关。

表 4 典型降雨条件下侵蚀泥沙养分富集比

g/kg

项目	20060624			20070317			20070307		
	雨前表土	泥沙携带	富集比	雨前表土	泥沙携带	富集比	雨前表土	泥沙携带	富集比
总氮	0.53	0.68	1.28	0.52	0.68	1.3	0.49	0.66	1.34
总磷	0.09	0.1	1.11	0.08	0.12	1.55	0.08	0.13	1.57

3 结论

(1) 在自然条件下,由于降雨强度的时间变化是不稳定和连续的,实际产流、产沙过程呈现出一峰或多峰的特性;同一场降雨条件下自然坡面的产流、产沙过程基本一致;坡面累积产沙量和累积径流量随时间延长呈现出先小幅增长后快速增加最后趋于平稳的变化。

(2) 坡面径流中氮磷的流失主要集中在产流前期,后期较均匀稳定;总磷随径流的输出浓度始终小于总氮输出浓度,且总磷变化稳定,而总氮波动较大。

(3) 氮、磷养分流失量均以泥沙携带为主。侵蚀泥沙中均存在养分富集现象,且总氮富集比要小于总磷富集比。

[参 考 文 献]

- [1] Sen Gupta M B, Cornfield A H. Phosphorus in calcareous soils IV: Nature of and factors influencing the fixation of added phosphate[J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 1963,14(12):873-877.
- [2] Ahuja L R, Sharpley A N, Yamamoto M, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interactions as determined by 32P [J]. Water Resources Research, 1981,17(4):967-974.
- [3] Douglas C L, King K A, Zuzel J F. Nitrogen and phosphorus in surface runoff and sediment from a wheat-pea rotation in Northeastern Region [J]. Journal of Environmental Quality, 1998,27(5):1170-1177.
- [4] Fraser A I, Harrod T R, Haygarth P M. The effect of rainfall intensity on soil erosion and particulate phosphorus transfer from arable soils [J]. Water Science and Technology, 1999, 39(12):41-45.
- [5] Waddell J T, Gupta S C, Moncrief J F, et al. Irrigation and nitrogen-management impacts on nitrate leaching under potato[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1):251-261.
- [6] Bouraoui F, Dillaha T A. ANSWERS-2000:Non-point source nutrient planning model [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000,122(11):1045-1055.
- [7] 陈皓,章申. 黄土地区氮磷流失的模拟研究[J]. 地理科学,1991,11(2):142-148.
- [8] 康玲玲,朱小勇,王云璋,等. 不同雨强下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999,16(4):536-543.
- [9] 刘秉正,李光录,吴发启. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报,1995,9(2):74-81.
- [10] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(3):55-58.
- [11] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [12] 蔡崇法,丁树文. 三峡库区紫色土坡地养分状况及养分流失[J]. 地理研究,1996,15(3):77-84.
- [13] 黄丽,丁树文. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究[J]. 水土保持学报,1998,12(1):9-13.
- [14] 马琨,王兆骞,陈欣,等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报,2002,16(3):16-19.
- [15] Tian G, Wang F, Chen Y. Effect of different vegetation systems on soil erosion and soil nutrients in red soil region of southeastern China[J]. Pedosphere, 2003, 13(2):121-128.
- [16] 水建国,柳俊,廖根清,等. 不同自然植被管理措施对红壤丘陵果园水土流失的影响[J]. 农业工程学报,2003, 19(6):42-46.
- [17] 王晓龙,李辉信,胡峰,等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N,P 流失特征研究[J]. 水土保持学报,2005, 19(5):31-34.
- [18] 刘洋,张展羽,张国华,等. 天然降雨条件下不同水土保持措施红壤坡地养分流失特征[J]. 中国水土保持, 2007(12):14-17.
- [19] 张展羽,左长清,刘玉含,等. 水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究[J]. 农业工程学报,2008, 24(11):41-45.
- [20] 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.
- [21] 郑海金. 赣北红壤坡面水土保持措施保水减沙作用研究[D]. 北京:北京林业大学,2010:33-37.
- [22] 朱智勇,解建仓,李占斌,等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(5):1-7.
- [23] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理与预测评价建模[D]. 重庆:西南农业大学,2002:4-20.
- [24] 黄满湘,章申,唐以剑,等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境,2001,10(1):6-10.