

芦溪流域非点源污染物流失的一般规律

胡远安,程声通,贾海峰

(清华大学环境科学与工程系,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084, E-mail: cst-den@tsinghua.edu.cn)

摘要:以芦溪小流域为研究对象,监测在自然降雨条件下,不同土地利用类型小区流域出口的污染物流失情况,研究一次降雨径流过程中非点源污染物流失的一般规律,以及不同前期降雨条件下的污染物流失特征。研究表明:随着前期降雨量的增大,SS 的流失明显降低,当试验前 5 天总降雨量为 15、115、161 mm 时,流域出口的 SS 流失浓度分别为 265.6、145.8 和 124.2 mg/L;流域出口的营养物质与 COD 受前期降雨条件的影响相对较小,波动幅度不大于 $\pm 15\%$ 。小区试验的结果表明:污染物流失浓度的一般规律为:旱地 > 居民点 > 草地 > 林地 > 水田。植被覆盖可有效地减少泥沙流失,当植被盖度从 50% 上升到 90% 时,泥沙流失浓度可减少 80%。土壤背景值是决定 TN 流失浓度的关键因子,旱地、草地、林地的 TN 流失浓度与土壤背景值的比值为 2.75%、2.79% 和 2.42%。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的流失浓度随植被盖度的增大而增大。

关键词:非点源污染;流域;小区;土地利用类型;降雨径流

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)06-0108-05

Regular Pattern of Non Point Source Pollutants Losses in Luxi Watershed

HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng

(Environmental Simulation and Pollution Control State Key Point Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: cst-den@tsinghua.edu.cn)

Abstract: The losses of non-point pollutant combined with natural rainfall events were monitored at outlets of Luxi watershed and several field plots with different land use. The paper probes characteristics of the sediment and chemical losses during a single rainfall-runoff process. The impact of preceding precipitation is also discussed. The results of field experiments show that the concentration of SS in runoff dropped off obviously with the increase of antecedent rainfall. The observed data were 265.6, 145.8, 124.2 mg/L respectively with precipitation of 15, 115, 161 mm in preceding 5 days. Compared to the losses of SS, nutrients and COD were not changed greatly by the preceding rainfalls. The fluctuations of pollutant concentration were less than 15%. The results from plots suggested that land use play an important role in pollutant losses. The following is the list ordered according to concentration of pollutant in runoff, from the highest to the lowest: Dry land, residential area, grassland, woodland and paddy land. Vegetation cover is effective on the reduction of soil erosion and sediment loss. About 80% SS could be cut down when the coverage changed from 50% to 90%. Losses of TN were mainly determined by the TN concentration in soil. The ratios of TN concentration in runoff to that in soil were 2.75%, 2.79%, 2.42% respectively for the land use of dry land, grassland and woodland. Augment of vegetation coverage contributed to increment of N losses, including $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$.

Key words: non-point sources pollution; watershed; field plots; land use; rainfall-runoff

近年来,随着点源污染逐步得到控制,非点源污染越来越引起关注。试验是非点源研究的主要手段之一。国外的非点源试验可以追溯到 100 多年前的水土流失观测。随着研究的深入,对有毒有害物质^[1](重金属、除草剂)、营养物质^[2~4](氮、磷)的观测逐步开展,并且在空间^[5]、时间尺度上不断扩展与延伸。我国土壤侵蚀与泥沙迁移研究历史较长,基础较为雄厚,近期的研究工作有滇东北坡耕地水土流失试验^[6]等。目前,非点源试验的主要研究内容包括:流域非点源污染物流失时空变化规律^[7];土地利用类型、地形等因素对产污特征的影响^[8,9];营养物质的流失逐渐成为研究的热点,已开展的试验包括云南水田化肥流失试验^[10],浙江德清红壤坡地磷流失试验^[11],广州赤红壤旱地营养物流失试

验^[12]等。本文以芦溪小流域为例,研究不同的降雨径流条件下非点源污染物的流失情况,以及不同下垫面的小区产污特征。

1 研究区域概况

本次试验区域为芦溪小流域(东经 113.85° ~ 114.25°,北纬 27.41° ~ 27.71°),位于赣江主要支流袁水上游,江西省萍乡市境内。流域气候为亚热带季风性气候,降雨充沛;多山地丘陵,上游与下游的落差约为 1700 m;土壤类型以红壤为主;绝大部分山地

收稿日期:2004-01-15;修订日期:2004-06-09

基金项目:国家环境保护总局、江西省环境保护局科研基金,清华大学环境科学与工程研究院 985 基金项目。

作者简介:胡远安(1977~),女,博士研究生,主要研究方向为环境系统分析。

植被覆盖状况良好,以常绿林为主;小部分丘陵的植被以自然生长的草本植物、灌木为主;主要耕地为水田,其它耕地(如旱地、菜地)所占比例不足 10%。芦溪小流域内工、矿企业不发达,点源污染较少,是观测非点源污染物流失规律的理想区域。

2 监测断面与试验小区设置

依据试验区面积的不同,以地表水环境为研究对象的非点源野外试验方法可以划分为小区试验、径流场试验、流域试验等。本次研究包括流域试验与小区试验,分别观测:

(1) 流域出口的降雨-径流-污染物浓度变化。在河流上设置断面,进行降雨后的水量、水质同步监测,研究汇水区降雨-径流-污染物流失的相互关系。水文、水质监测断面和雨量站的分布如图 1 所示。水文监测断面即芦溪雨量站/水文站。由于在水文站与常规水质监测断面之间有排污河道汇入,水质监测断面安排在常规断面上游约 50 m 处。图中的流域边界线以水文监测断面为出口划定,流域面积为 334 km²。流域试验采集的水样要求能够反映水质随降雨-径流的变化情况。

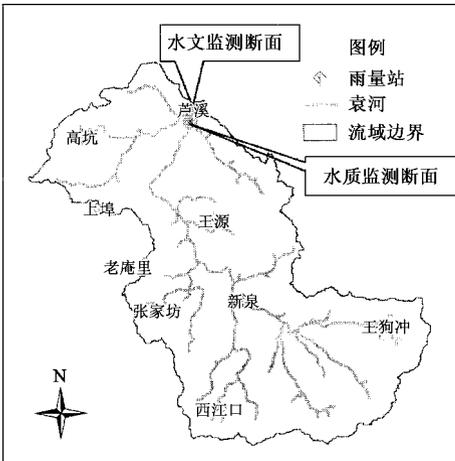


图 1 芦溪小流域监测断面与雨量站示意图
Fig.1 Locations of monitoring cross sections and precipitation stations

(2) 不同地表条件下非点源污染物的流失特征。选取不同地表条件的小区为研究对象,主要研究下垫面对非点源污染负荷的影响,以研究土地利用的影响为主,坡度、植被盖度等因素的影响为辅。根据芦溪小流域土地利用的类型、面积和分布情况,确定试验小区类型主要包括水田、林地、居民点、旱地和草地。小区试验地的概况见表 1。

表 1 试验小区概况

Table 1 Characteristics of field plots

编号 ¹⁾	土地利用	坡度/(°)	覆盖度/%	土壤
A1	林地(常绿林)	8~15	80~90	酸性紫色土
A2	水田	<1	60~70	潴育型潮沙泥田
A3	旱地	1~3	20~30	酸性紫色土
A4	草地	1~3	>90	酸性紫色土
A5	居民点	<1		
B1	水田	0		潴育型潮沙泥田
B2	林地 1(常绿林)	24	90	酸性紫色土
B3	荒地(杂草)	25	10	酸性紫色土
B4	林地 2(常绿林)	25	50	酸性紫色土
B5	旱地(蔬菜)	0	30	酸性紫色土
B6	林地 3(常绿林)	14	90	酸性紫色土
B7	林地 4(常绿林)	15	50	酸性紫色土

1) 编号为 A1~A4 的小区位于流域试验的水质监测断面(114.03°E, 27.63°N)附近,和流域出口同时监测;编号 B1~B7 的小区距水质监测断面较远,利用前期修筑的工程收集水样。

3 试验结果与讨论

3.1 流域出口的降雨-径流-污染物变化规律

(1) 以 2001-06-09~06-10 的试验数据为例,简单阐述研究区域在一次降雨-径流过程中非点源污染的情况。

在一次降雨-径流过程中,流域出口非溶解性污染物 SS 随流量的变化见图 2。SS 与流量的正相关关系较为显著。洪峰前污染物浓度小有振荡,这可能是因为离水质监测断面较近的部分污染源产生的泥沙在暴雨径流的影响下较快的进入水体,形成一个小污染高峰。随着流域径流的不断汇集,水位快速拉升,SS 浓度迅速增加,污染高峰与洪峰几乎同时出现。在整个起涨、峰值、回落过程中,污染物浓度的增加/减少趋势基本与流量的增减一致,但峰后污染物浓度下降速度比峰前的上升速度稍慢。

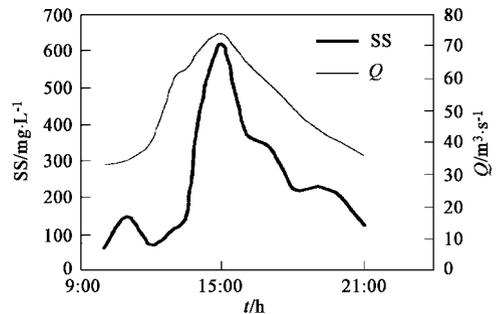


图 2 流域出口 SS 浓度随径流量的变化
Fig.2 Variation of SS concentration with runoff at the outlet of watershed

营养物质的流失与非溶解性污染物存在着明

显的差异.以 TN 为例(见图 3),溶解性污染物负荷与流量的相关性较弱,基本上呈锯齿形波动.从总体上来说,营养物质流失浓度峰值的分布规律并不明显:TN、NH₄⁺-N 的峰值出现时间略先于洪峰;TP 的峰值难以确认;COD 在洪峰前后都出现了峰值.部分污染物的流失情况见表 2.表 2 中的平均浓度是采集的所有水样直接混合后所得到的浓度;而按径流量加权后的平均浓度则是分时段采样的监测数据乘以当时的径流量,再平均所得.从定义上来说,后者可以认为是径流过程中污染物输送的平均浓度.从数据对照可以看出,两者的差异并不大.但是,由各污染物的最大、最小浓度可以看出,在一次试验中仅用一次水样的数据代替平均浓度仍然具有较大的风险.

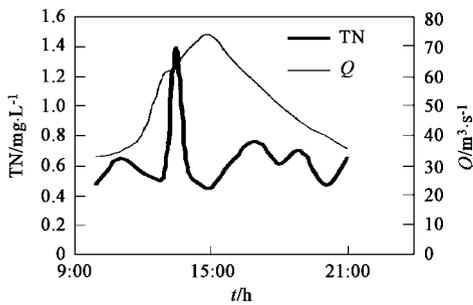


图 3 流域出口 TN 浓度随径流量的变化
Fig.3 Variation of TN concentration with runoff at the outlet of watershed

表 2 流域出口污染物流失情况/ mg·L⁻¹

Table 2 Pollutant losses at the outlet of watershed/ mg·L⁻¹

监测项目	TP	NH ₄ ⁺ -N	COD
最大浓度	0.07	0.12	4.8
最小浓度	0.04	0.08	3.0
平均浓度	0.05	0.11	3.80
按径流量加权的平均浓度	0.05	0.11	3.86

表 3 3 次试验的降雨-径流-污染物流失情况

Table 3 Rainfall, runoff and pollutant losses of 3 field experiments

编号	降雨量/ mm		流量/ m ³ ·s ⁻¹			污染物平均流失浓度/ mg·L ⁻¹					
	试验前 ¹⁾	期间	试验前	平均	峰值	TN	TP	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	SS
1	15	39	8.4	51.2	73.8	0.63	0.05	3.86	0.11		265.6
2	115	46	18.3	67.6	126	0.76	0.06	3.55	0.11	0.44	145.8
3	161	47	47.3	96.5	194	0.69	0.07	4.35	0.3	0.37	124.2

1) 试验前 4 天的降雨量总和

(1) 不同土地利用类型的污染物流失存在着较大的差异(表 4).不同土地利用类型产生的 SS、TN、NO₃⁻-N 流失差别较大,而 COD、NH₄⁺-N 的排放差异相对较小.污染流失浓度的一般规律为旱地 > 居

(2) 选择 3 次流域试验结果进行对照分析,阐述不同前期降雨条件下的非点源污染物输送情况.试验的降雨、径流与污染物流失情况见表 3,试验时间分别为 2001-06-09 ~ 06-10, 2002-06-28 ~ 06-29, 2002-06-29 ~ 06-30.

3 次降雨均发生在研究区域的多雨季节,此时流域内自然植被覆盖状态良好,主要的农作物——水稻处于生长季节.3 次试验的前期与试验期间降雨存在显著差别.第 1 次试验前降雨量较少,且试验前 1 天基本无降雨,受前期降雨的影响很小;第 2 次前 5 天内降雨量较大,但试验前 1 天流域内降雨量较小;第 3 次试验则代表连续降雨情况下的降雨-径流-产污状况.由试验结果可知:

营养物质、COD 的流失浓度受试验前、试验期间降雨量的影响相对较小.在 3 次试验中, TN、TP、COD 的波动幅度均不大于 ±15%; NO₃⁻-N 的流失浓度较为接近;前 2 次试验的 NH₄⁺-N 浓度几乎一致,但是第 3 次试验的浓度较高,原因不明,不能排除野外试验的偶然性的影响.

SS 的浓度受前期降雨的影响很大.尽管第 2 次试验的降雨量大于第 1 次试验,平均流量与峰值流量更是达到了第 1 次试验的 1.32 与 1.70 倍,SS 的平均流失浓度仅为第 1 次试验的 54.9%,输送总量则减少了 27.5%.对比第 3 次与第 1 次试验,可以得到近似的结论.这说明经过前期的降雨冲刷作用后,再次降雨造成的泥沙流失量减少.

3.2 不同下垫面的非点源污染物流失一般规律

径流携带的污染物浓度是非点源污染负荷计算的重要参数.一般来说,污染物浓度与土地利用类型密切相关,同时受降雨类型、径流过程、降雨前期条件等一系列因素的影响,具有很强的不确定性.在本次研究中,可以发现,小区的产污有以下特点:

民点 > 草地 > 林地 > 水田,但林地的 TN 和 NO₃⁻-N 流失量较高,这可能是林地土壤背景值较高引起的.旱地与水田的污染物流失在不同时期变化较大,草地的变化幅度较小,而居民点与林地的流失浓度相

对较稳定。

表 4 不同土地利用类型的污染物流失¹⁾

Table 4 Pollutant losses from field plots with different land use

污染物流失浓度 / mg·L ⁻¹	土地利用类型					
	旱地	草地	林地	水田	居民点	
TN	Max	2.83	0.92	3.57	0.54	0.81
	Min	0.95	0.26	2.03	0.14	0.44
	Ave	1.74	0.61	2.89	0.34	0.62
TP	Max	2.61	0.3	0.04	0.2	0.2
	Min	0.15	0.09		0.04	0.15
	Ave	1.1	0.17		0.12	0.17
NH ₄ ⁺ -N	Max	0.71	0.65	0.14	0.46	0.44
	Min	0.1	0.12	0.08	0.08	0.2
	Ave	0.4	0.34	0.11	0.18	0.32
NO ₃ ⁻ -N	Max	2.04	0.06	2.78	0.06	0.2
	Min	0.55	0.02	2.56		0.13
	Ave	1.29	0.04	2.6	0.02	0.15
COD	Max	17.4	7.6	2.8	5.8	7.5
	Min	4.4	4.9	2.3	3.8	7.1
	Ave	9.77	6.53	2.5	5.1	7.3
SS	Max	336	127	152.8	80.6	198.4
	Min	226.4	54.4	17.8	9.4	81.8
	Ave	264.7	89.1	84.3	34.9	140.1

1)表 4 的数据来源于表 1 中编号为 A1 ~ A5 的试验小区,未统计编号为 B1 ~ B7 的试验数据。

(2) 单次降雨-径流过程中,污染物流失浓度与土壤背景值、小区植被盖度、坡度等因素直接相关。

旱地、草地和林地径流携带的 TN 与土壤中 TN 背景值存在着明显的正相关关系,见表 5。水田与其它小区的差异可能源于其降雨-径流过程的特殊性:由于蓄水的关系而直接产生径流,降雨与水田土壤并未直接接触,另外,田间蓄水起到了稀释作用。TP 与土壤本底值的关系不明显,这可能是因为磷较难以溶解,以颗粒形式流失为主。

在以自然植被为主的土地利用类型中,TN 的流失与坡度、盖度的变化对应关系并不显著,如表 6 (试验日期:2001-6-9 ~ 6-10) 所示,当土壤本底值一致时,B3、B4 在单次降雨中 N 流失的差异很小,随着植被盖度的上升,N 的流失反而加剧,这一结果与张兴昌等人的研究结果相似^[13]。

表 5 土壤 TN 背景值对 TN 流失的影响

Table 5 Effect of TN in soil on TN losses in runoff

编号	名称	TN 流失浓度	TN 土壤背景值	TN 流失浓度/土壤背景值/ %
		/ mg·L ⁻¹	/ mg·L ⁻¹	
A3	旱地	1.43	52.0	2.75
A4	草地	0.92	33.0	2.79
A1	林地	2.03	83.9	2.42
A2	水田	0.41	60.0	0.68

表 6 土地利用、盖度、坡度对 N 流失的影响

Table 6 Effects of land use, vegetation coverage and slope on N losses

编号	土地利用类型	盖度	坡度	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
		/ %	/ (°)	/ mg·L ⁻¹	/ mg·L
B3	荒坡地(杂草)	10	25	2.79	0.06
B4	林地 2(常绿林)	50	25	2.22	0.12
B2	林地 1(常绿林)	90	24	0.92	0.052
B6	林地 3(常绿林)	90	14	0.95	0.008
B7	林地 4(常绿林)	50	15	0.64	0.014

植被对泥沙流失的截留作用显著(表 7),而坡度对于泥沙流失的影响小于植被盖度。泥沙流失浓度最高的是无立木生长的草坡地,盖度为 90% 的试验点 B2、B6 泥沙流失浓度远小于盖度为 50% 的试验点 B4、B7。植被覆盖可有效地减少泥沙流失,这可归结于植被茎叶对降雨的缓冲作用、植被根系对土壤的固结作用以及地表植被对径流与泥沙传递的阻碍作用等等。对比 B2、B6 可以发现,对于高盖度的植被来说,坡度的影响极其微小;对低盖度的植被而言,坡度的影响显著,陡坡(B4)流失浓度明显高于缓坡(B7)。

表 7 土地利用、盖度、坡度对 SS 流失的影响

Table 7 Effects of land use, vegetation coverage and slope on SS losses

编号	土地利用类型	盖度/ %	坡度/(°)	SS/ mg·L ⁻¹
B2	林地 1(常绿林)	90	24	5.6
B4	林地 2(常绿林)	50	25	55.5
B6	林地 3(常绿林)	90	14	8
B7	林地 4(常绿林)	50	15	32
B3	荒坡地(杂草)	80	25	266.4

(3) 污染物的流失受前期降雨的影响。受前期降雨的影响,TN 与 TP 的流失浓度普遍降低,对照第 1 次(2001-06-09 ~ 06-10) 与第 2 次(2002-06-28 ~ 06-29) 小区试验结果,可以发现:TN(图 4) 除林地外,TP(图 5) 除居民点外,小区的污染物流失浓度均降低。

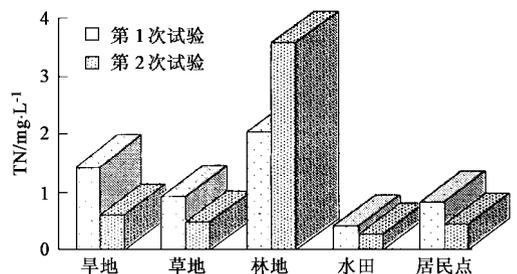


图 4 不同前期降雨下的 TN 流失

Fig. 4 Variation of TN losses with different preceding precipitation

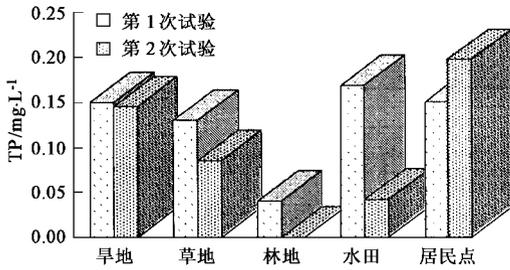


图5 不同前期降雨下的 TP 流失

Fig.5 Variation of TP losses with different preceding precipitation

SS(图6)的流失浓度受前期降雨的影响比营养物质更为明显.所有小区的SS流失浓度出现了不同幅度的下降.这极有可能是因为在前期降雨的冲刷作用下,土壤表层较易被径流携带的颗粒物已经大量流失.

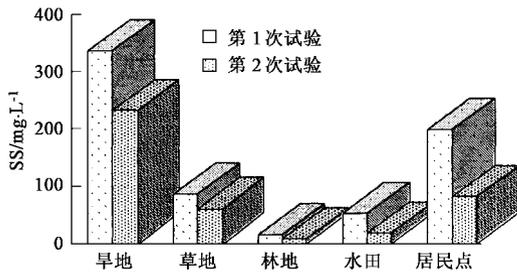


图6 不同前期降雨下的 SS 流失

Fig.6 Variation of SS losses with different preceding precipitation

对比流域出口与小区试验的监测数据,可以发现:大空间尺度内污染物的流失规律与小尺度的研究结果基本吻合.

4 结论

非点源在空间分布上的广泛性与污染负荷的不确定性,造成了非点源污染控制与管理的极大困难.在不同空间尺度上的非点源试验有助于认识非点源污染对地表水质的影响,掌握研究区域的非点源污染的总体状况,并识别流域内主要的污染源.通过本次试验可知:

(1)前期降雨对污染物流失影响显著,即使雨量较小,长期干旱后的初次降雨仍然极易造成严重的非点源污染;与N、P的流失相比,SS受前期降雨的

影响尤为明显.

(2)不同污染物流失的主要影响因子不同:SS的流失与土地利用类型、植被盖度、坡度等因素密切相关.当植被盖度较小时,坡度增加,SS流失量增大.植被盖度的增加可以明显减少SS的流失,但NO₃⁻-N与NH₄⁺-N的流失增加.TN的流失浓度基本与土壤背景值成正比.TP和COD的流失没有观察到明显的变化规律.

(3)从总体上来说,耕地和居民点是流域内的主要非点源;林地的TN、NO₃⁻-N流失不容忽视.必须指出的是:在本次试验中,没有观测施肥后旱地与水田的污染物流失情况;因此,耕地对非点源污染的贡献有可能被低估.

参考文献:

- [1] Wu T L, Correll D L, Remenapp H E H. Herbicide runoff from experimental watersheds[J]. J Environ. Qual., 1983, 12(3): 330 ~ 336.
- [2] Angle J S, Mc Clung G, Mc Intosh M S, et al. Nutrient losses in runoff from conventional and no till corn watershed[J]. J. Environ. Qual., 1984, 13: 431 ~ 435.
- [3] Wendt R C, Corey R B. Phosphorus variations in surface runoff from agricultural lands as a function of land use[J]. J. Environ. Qual., 1980, 9: 130 ~ 136.
- [4] Andrew N Sharpley, William J Gburek, G Folmar, et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania[J]. Agricultural Water Management, 1999, 41: 77 ~ 89.
- [5] Rossi Pisa P, Preti F, Rossi M, F Ventura, et al. Water, soil and chemical losses: field experiments and model analysis[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 39(3): 93 ~ 102.
- [6] 杨子生. 滇东北山区坡耕地水土流失试验[J]. 山地学报, 1999, 17(增刊): 6 ~ 9.
- [7] 李俊然, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征[J]. 地理科学学报, 2002, 22: 238 ~ 242.
- [8] 邬伦, 李佩武. 降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1): 111 ~ 116.
- [9] 杨金玲, 张甘霖, 张华, 等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 16 ~ 23.
- [10] 刘忠翰, 彭江燕. 化肥氮素在水稻田中迁移与淋失的模拟研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 312 ~ 316.
- [11] 陈欣, 王兆骞, 杨武德. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 374 ~ 377.
- [12] 吴雪彪, 陈士银. 旱耕赤红壤中氮、磷流失污染研究[J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19(2): 58 ~ 62.
- [13] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, 6: 16 ~ 19.