

海南岛三大流域农业土壤源污染物流失特征研究

宋玉梅, 周石池, 王 瑞, 周荣清, 唐文浩

(海南大学环境与植物保护学院, 海南 儋州 571737)

摘 要:采用径流场结合人工模拟降雨方式,研究了海南岛万泉河、南渡江和昌化江三大流域土壤中氮、磷、有机质等营养物质的流失特征。结果表明,三大流域土壤径流系数和泥沙流失速率的大小顺序为:暴雨>大雨>中雨;相同雨强条件下,万泉河的径流系数与南渡江相近,昌化江最小;泥沙流失速率大小顺序为:万泉河>南渡江>昌化江;雨强对总磷(TP)流失速率的影响达到极显著水平,磷随径流流失以颗粒磷(PP)为主;氮在雨强较小时以可溶氮(DN)流失为主,当达到暴雨时则以颗粒氮(PN)流失为主;雨强越大,地表径流中 COD、TN、DN 和 PN 流失速率越高。三大流域区土壤养分随泥沙流失特征相似,不同雨强条件下,三大流域的总氮、总磷和有机质流失速率的规律一致,雨强越大,流失速率越高;在同一雨强条件下,三流域区总氮、总磷和有机质随泥沙流失速率为:昌化江>万泉河>南渡江。影响面源流失的主要因素为坡度、雨强、土质等。

关键词:模拟降雨;海南岛三大河流;农业面源污染;土壤;流失速率;特征

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2171-07

Characteristics of Agricultural Soil Pollutant Loss in Three Major Rivers of Hainan, China

SONG Yu-mei, ZHOU Shi-chi, WANG Rui, ZHOU Rong-qing, TANG Wen-hao

(College of Environmental and Plant Protection, Hainan University, Danzhou 571737, China)

Abstract: The runoff characteristics of agricultural non-point source pollutants have drawn much attention from both domestic and overseas. Due to the absence of non-point source research in Hainan, the paper focused on nutrient loss, such as nitrogen(N), phosphorus(P) and organic matter(OM), of tropical soils in three typical rivers: Wanquan river, Changhuajiang river and Nanduijiang river in Hainan by using artificial simulated rainfall together with runoff field methods, aiming at revealing the contribution of agricultural non-point source pollution to river water pollution. The results showed that, as for the soil runoff of soil erosion ratio the order was rainstorm>heavy rain>moderate rain. Under the same rain intensity, the runoff coefficient of Wanquan river was similar to that of Nanduijiang river, Changhuajiang river was smallest; the soil erosion ratio of Wanquan river was largest, Changhuajiang river was smallest. Particulate phosphorus(PP) was the main form of nutrient loss under runoff erosion. However, dissolved nitrogen(DN) was main form of soil nitrogen runoff under smaller rainfall intensity, particulate nitrogen(PN) was the main form in heavy rain. The stronger the rain was, the higher the erosion ratio of chemical oxygen demand(COD), total nitrogen(TN), DN and PN was. The erosion features of soil nutrient which was carried by soils in three river basins were similar, so was the erosion ratio of N, P and organic matter. Slope, rainfall intensity and soil characteristics contributed to the losses of agricultural non-point source pollutants.

Keywords: artificial rainfall; three major rivers in Hainan; agricultural non-point source pollution; soil; erosion rate; characteristics

2010年2月9日环境保护部发布第一次全国污染源普查公报指出:2007年全国主要污染物排放总

量:废水中化学需氧量为3 028.96万t,氨氮为172.91万t,总磷为42.32万t,总氮为472.89万t。农业源污染物排放对水环境的影响较大,其化学需氧量排放量为1 324.09万t,占化学需氧量排放总量的43.7%。农业源也是总氮、总磷排放的主要来源,其排放量分别为270.46万t和28.47万t,分别占排放总量的57.2%和67.4%。要从根本上解决我国的水污染问题,

收稿日期:2010-04-28

基金项目:海南省国土资源厅资助项目

作者简介:宋玉梅(1984—),女,广东深圳人,硕士研究生,从事环境污染控制与资源化技术方面的研究。

E-mail: songyumei2005@sohu.com

通讯作者:唐文浩 E-mail: twh1229@163.com

必须把农业源污染防治纳入环境保护的重要议程。当前,以农业面源污染特别是氮磷的流失特征与负荷为国内外研究的热点,尤其在流域尺度上开展了野外监测、模型模拟及污染控制研究^[1-11]。但是,作为造成水体富营养化的农业面源重要污染类型如畜禽养殖和农村居民生活污水是容易作为点源来进行污染控制与管理的,而农业生产方式及农业土壤养分流失则是面源污染控制的重点和难点。

万泉河、南渡江和昌化江为海南岛的三大河流,集水面积均超过 3 000 km²,流域面积占全岛面积的 47%。随着海南社会经济的迅速发展,产生的各种污染特别是农业面源污染对海南岛河流水体环境也带来了越来越严峻的压力和冲击。农业面源污染是分布最为广泛的面源污染,海南乃至全国农业面源污染的研究刚刚起步,目前海南只对土壤侵蚀^[12-14]及流域水质和水体纳污能力^[15-18]有所研究,对流域面源污染缺少系统、可靠的基础资料,对污染源的状况,面源污染对河流水体污染贡献情况基本处于空白的状况。因此对海南三大流域农业面源污染流失特征的研究对改善农业生产方式、控制农业面源污染和防止面源污染引起的环境问题具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验观测布点

根据万泉河、南渡江和昌化江三大流域的地势地貌和农业土地利用特点,选择各流域中最具代表性的地貌类型、土壤类型、土壤质地、坡度和植被类型的点,每个流域各设 6~7 个人工降雨地表径流观测场。供试区土壤及试验点基本情况见表 1。

1.2 试验设计

每个径流小区面积为 5 m×4 m,四周用 0.4 m 高的 PVC 板围成,插入土中 0.2 m 外露 0.2 m,防止降雨泥沙溅出和小区外围水分进入小区,下部用集流装置收集地表产流,观测产流过程。根据试验地区降雨特点设 3 种降雨强度:中雨(1.0 mm·min⁻¹),大雨(1.65 mm·min⁻¹),暴雨(2.55 mm·min⁻¹),同一强度降雨历时 10 min。每流域设 6~7 个点,每处理设 3 个重复。收集地表径流,现场进行泥沙与水样的分离,水样测定前放入冰箱里 2 ℃条件下保存,泥沙样自然风干待测。

1.3 试验仪器

QYJY-501 便携式全自动不锈钢模拟降雨器(西安清远测控技术有限公司),系统由电源主控制器、数

表 1 供试土壤及试验场基本情况
Table 1 Basic profiles of experiment soil and test field

流域	地点	坐标	海拔/m	坡度 /°	土类	质地	容重/g·cm ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹
万泉河	万宁新中农场	18°52'N, 110°08'E	159	6	砖红壤	砂壤土	1.27	23.98	0.69	0.43
	琼海东升农场	19°17'N, 110°25'E	36	8	砖红壤	砂壤土	1.58	13.68	0.51	0.35
	琼海东太农场	19°06'N, 110°13'E	43	16	砖红壤	砂壤土	1.41	19.38	0.70	0.44
	万宁东和农场	18°47'N, 110°15'E	25	4	砖红壤	砂壤土	1.41	10.94	0.44	0.64
	琼海嘉积镇	19°12'N, 110°27'E	12	2	水稻土	壤土	1.34	15.20	0.75	0.56
	琼中乌石农场	19°07'N, 109°52'E	198	6	砖红壤	壤土	1.25	18.92	1.46	1.06
南渡江	白沙农场	19°11'N, 109°28'E	201	5	砖红壤	砂壤土	1.45	13.69	0.56	0.36
	海口龙潭镇	19°54'N, 110°25'E	13	2	水稻土	砂壤土	1.45	18.04	0.53	0.62
	澄迈昆仑农场	19°27'N, 109°48'E	153	13	砖红壤	砂壤土	1.36	17.57	0.54	0.24
	屯昌南吕农场	19°15'N, 110°00'E	207	6	砖红壤	砂壤土	1.41	16.03	0.43	0.26
	海口桂林洋农场	19°59'N, 110°29'E	2	2	水稻土	壤土	1.29	7.03	0.33	0.36
	儋州松涛水库	19°24'N, 109°33'E	194	3	砖红壤	粘壤土	1.17	25.46	1.19	1.09
昌化江	定安金鸡岭农场	19°35'N, 110°15'E	153	7	砖红壤	粘壤土	1.35	32.28	1.06	0.57
	昌江十月田	19°19'N, 108°56'E	85	4	砖红壤	砂壤土	1.38	12.52	0.38	0.72
	乐东千家镇	18°32'N, 109°04'E	166	10	砖红壤	砂壤土	1.47	12.08	0.49	0.25
	五指山畅好农场	18°43'N, 109°33'E	387	4	砖红壤	砂壤土	1.48	15.90	0.63	0.43
	乐东九所	18°42'N, 109°09'E	161	5	砂土	砂壤土	1.63	9.54	0.33	0.31
	东方零公里	19°07'N, 108°47'E	70	4	燥红土	砂壤土	1.47	18.79	0.80	0.34
	东方广坝农场	19°06'N, 108°54'E	117	7	砖红壤	壤土	1.26	22.08	0.97	0.41
	昌江石碌水库	19°14'N, 109°04'E	106	7	砖红壤	粘壤土	1.38	39.66	1.26	0.54

据采集器、降雨供水管道、模拟降雨喷头和雨量计以及电脑分析软件等组成,采用先进的闭环自动控制技术和旋转下喷式喷头,配备了称重式雨量计。降雨高度为 4 m,降雨均匀系数在 80%以上。

1.4 测试项目与方法

地表径流水样主要测 TP、PP、DP、总氮(TN)、PN、DN、COD 等,泥沙样测定全氮、全磷、有机质等。TP 采用过硫酸钾氧化, 钼锑抗比色法测定;DP 用经 0.45μm 滤膜过滤后水样,DP 与径流水样 TP 的测定方法一致;TN、DN 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;PN 和 PP 用差减法计算出;COD 用重铬酸钾法。全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 法-钼锑抗比色法;全氮用半微量开氏法;有机质用重铬酸钾容量法-外加热法。

2 结果与讨论

2.1 三大流域径流和泥沙流失特征

从表 2 可看出,不同降雨强度处理时,三大流域径流小区的径流系数和泥沙流失速率差异明显,径流系数及泥沙流失速率大小顺序为暴雨>大雨>中雨,以暴雨径流速率及泥沙流失速率最高,大雨次之,中雨最低。在相同雨强条件下,万泉河的径流系数与南渡江相近,昌化江最小;泥沙流失速率大小顺序为万

泉河>昌化江>南渡江,以万泉河泥沙流失速率最高,南渡江次之。

2.2 径流中养分流失特征

2.2.1 地表径流中磷的流失特征

由表 3 可知,雨强对土壤磷的流失速率有明显的影响。土壤径流液中 TP 的流失速率,在中雨强度时为万泉河>昌化江>南渡江;在大雨强度时为南渡江>万泉河>昌化江;在暴雨强度时为昌化江>万泉河>南渡江。其中暴雨时南渡江、万泉河和昌化江流域土壤中 TP 流失速率分别是中雨时的 234.78%、166.67%和 284.62%。PP 随径流流失是 TP 流失的主要形态。在不同雨强条件下 PP 流失速率占 TP 的 50%以上,其流失速率的变化与 TP 的一致。

2.2.2 地表径流中氮的流失特征

由表 4 可知,随着雨强的增大,三流域的 TN、DN、PN 的流失速率也随之增大。暴雨时 TN、DN、PN 的流失速率最大,大雨时次之,中雨时最小。三流域地表径流 PN/TN 在中雨和大雨时比暴雨小。除昌化江外,南渡江和万泉河在中雨及大雨时 PN/TN 小于 50%,说明 N 在雨强比较小时的流失以 DN 为主。三大流域在雨强为暴雨时 PN/TN 为 68.33%~80.68%,说明 N 在雨强比较大时的流失以 PN 为主。

表 2 不同雨强时三流域径流系数及泥沙流失速率
Table 2 Runoff coefficient and sediment erosion rate under different rainfall intensities

流域	中雨			大雨			暴雨		
	南渡江	万泉河	昌化江	南渡江	万泉河	昌化江	南渡江	万泉河	昌化江
径流系数/%	22.99	23.11	18.82	33.26	36.40	26.12	54.73	52.04	46.68
泥沙/mg·m ⁻² ·min ⁻¹	389.94	484.98	426.21	630.73	813.46	675.68	1 741.33	2 114.15	1 816.82

表 3 不同雨强条件下磷的流失速率
Table 3 Erosion rate of phosphorus under different rainfall intensities

流域	南渡江磷流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹				万泉河磷流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹				昌化江磷流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹			
	总磷 TP	可溶磷 DP	颗粒磷 PP	PP/TP/%	总磷 TP	可溶磷 DP	颗粒磷 PP	PP/TP/%	总磷 TP	可溶磷 DP	颗粒磷 PP	PP/TP/%
中雨	0.23	0.11	0.12	50.43	0.39	0.06	0.33	84.42	0.26	0.09	0.17	64.39
大雨	0.28	0.13	0.15	54.45	0.24	0.09	0.15	63.97	0.23	0.09	0.139	59.91
暴雨	0.54	0.07	0.47	86.94	0.65	0.06	0.58	90.19	0.74	0.17	0.56	76.32

表 4 不同雨强条件下氮的流失速率
Table 4 Erosion rate of nitrogen under different rainfall intensities

流域	南渡江氮流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹					万泉河氮流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹					昌化江氮流失速率/mg·m ⁻² ·min ⁻¹				
	总氮 TN	可溶氮 DN	颗粒氮 PN	PN/TN/%		总氮 TN	可溶氮 DN	颗粒氮 PN	PN/TN/%		总氮 TN	可溶氮 DN	颗粒氮 PN	PN/TN/%	
中雨	1.49	0.79	0.71	47.22		1.39	0.77	0.62	44.60		0.87	0.45	0.42	48.21	
大雨	2.33	1.24	1.09	46.70		3.41	2.02	1.39	40.76		1.70	0.67	1.03	60.69	
暴雨	6.19	1.60	4.59	74.12		7.61	1.67	5.20	68.33		7.27	1.41	5.87	80.68	

2.2.3 地表径流中 COD 的流失特征

径流液中的 COD 主要为溶解性有机质,其流失规律与 TN 有相关性。不同降雨条件下,三流域 COD 流失速率规律一致。雨强越大,三流域随地表径流带走的 COD 越多。三流域相比较,在同一雨强条件下,南渡江 COD 流失速率最大,万泉河其次,昌化江最小。暴雨时昌化江的增幅最大,是大雨的 358%;南渡江、万泉河分别是 265%和 191%。如图 1 所示。

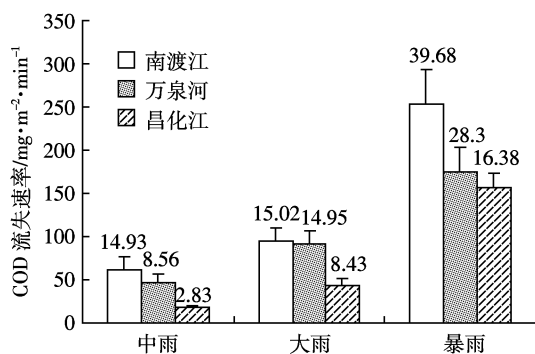


图 1 不同雨强条件下 COD 的流失速率

Figure 1 Erosion rate of COD under different rainfall intensities

2.3 径流泥沙中养分流失特征

降雨过程中,随土壤侵蚀的发生,土壤养分也随泥沙及地表径流流失,并遵循一定的规律。

如图 2 所示,在同一雨强条件下昌化江有机质流失速率最大,其次是万泉河,南渡江最小。在同一雨强条件下,三流域总氮流失速率为:昌化江>万泉河>南渡江(图 3)。

总磷的流失速率在三流域中的变化规律如图 4 所示。在雨强为中雨时,万泉河泥沙中总磷流失速率为 $0.273 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,昌化江为 $0.242 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,南渡江为 $0.195 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,万泉河总磷流失率比

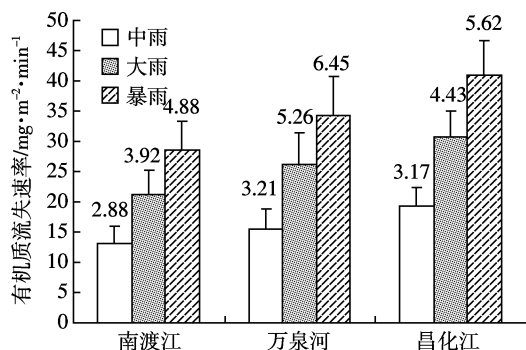


图 2 三流域泥沙中有机质的流失速率

Figure 2 Erosion rate of organic matter from sediments under different rainfall intensities

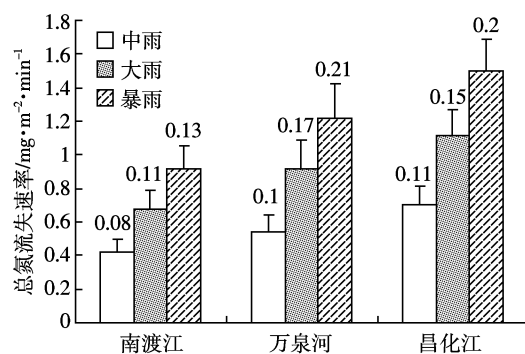


图 3 三流域泥沙中总氮的流失速率

Figure 3 Erosion rate of total nitrogen from sediments under different rainfall intensities

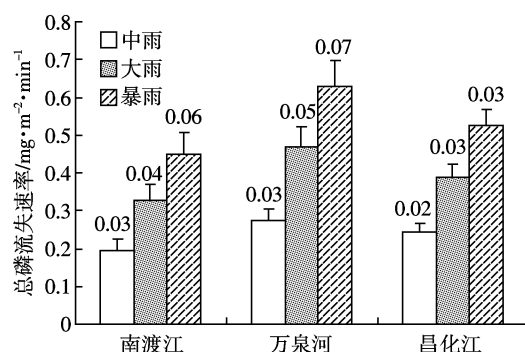


图 4 三流域泥沙中总磷的流失速率

Figure 4 Erosion rate of total phosphorus from sediments under different rainfall intensities

昌化江大。在大雨和暴雨条件下现象相同,万泉河的总磷流失率最大,南渡江总磷流失率最小。

不同雨强对径流泥沙养分流失速率有明显的影响。由图 2 所示,南渡江、万泉河和昌化江的泥沙中携带有机质、总氮和总磷的流失速率随着雨强的增大而增大的规律;在不同降雨条件下,三大流域泥沙中有机质、总氮和总磷流失速率增幅相近:南渡江、万泉河和昌化江泥沙中有机质流失速率暴雨是大雨的 134.31%、130.63%和 133.66%,大雨是中雨的 161.75%、169.01%和 159.07%;总氮流失速率暴雨是大雨的 134.95%、132.68%和 134.05%,大雨是中雨的 163.31%、170.39%和 159.43%;总磷流失速率暴雨是大雨的 138.34%、134.40%和 134.62%,大雨是中雨的 167.18%、171.43%和 161.16%。

2.4 径流液与泥沙中营养物流失强度比较

由表 5 所示,三流域径流中 COD、TN 占有质、全氮流失强度中的绝大比值,总趋势是随雨强的增大而增大,两种营养物质在相同雨强下,径流携带强度与总流失强度比值顺序为南渡江>万泉河>昌化江。

表 5 径流液与泥沙中营养物流失强度比值(%)

Table 5 Ratio of loss strength of nutrient from liquid runoff and sediment loss(%)

流域	雨强	COD/ 有机质	泥沙有机 质/有机质	TN/ 全氮	泥沙总氮/ 全氮	TP/ 全磷	泥沙总磷/ 全磷
南渡江	中雨	82.46	17.54	78.17	21.83	45.45	54.55
	大雨	81.82	18.18	77.38	22.62	53.76	46.24
	暴雨	89.88	10.12	87.08	12.92	45.66	54.34
万泉河	中雨	75.37	24.63	72.14	27.86	40.98	59.02
	大雨	77.78	22.22	77.58	22.42	66.67	33.33
	暴雨	83.63	16.37	84.64	15.36	49.26	50.74
昌化江	中雨	48.19	51.81	55.36	44.64	47.85	52.15
	大雨	58.85	41.15	60.47	39.53	62.89	37.11
	暴雨	79.30	20.70	82.94	17.06	41.49	58.51

总磷被径流携带流失与泥沙携带流失比值相近,且雨强对比值影响没有显著的规律。由此可知,三流域在降雨条件下,营养物质以径流携带流失为主,泥沙携带流失也是养分流失的主要途径之一。因此,改变施肥方式及控制施肥量是防止养分流失的关键。

2.5 影响水土流失强度的因素分析

由表 6 可知,从相关系数看来,坡度和雨强与水土流失强度指标相关性比较密切,除了与 COD 流失速率和 TP 流失速率相关不显著外,坡度和雨强与其水土流失强度指标为正相关,且与雨强关系最为密切。覆盖率与 COD 流失速率存在负相关,覆盖率和土壤含水量与其水土流失强度指标相关不显著。

3 讨论

(1)一般来说,草地和林地产流中的磷以 DP 为主,农业用地中磷以 PP 为主^[19-22],约占 75%~95%^[23]。本研究 PP/TP 值为 50.43%~90.19%,其 P 的流失特征与前人的研究结果比较吻合。

(2)造成三大流域土壤的径流系数和泥沙流失速率差异的主要原因可能是流域地面坡降与土壤含水

量的差异。万泉河、昌化江和南渡江的平均坡降分别为 1.12‰、13.9‰和 0.716‰,坡降越大,越容易产生径流,形成泥沙冲刷现象;万泉河和南渡江为海南岛的多雨区,土壤含水量较高,在相同雨强条件下,土壤含水率越高,越容易产生径流。而径流量与坡度是水土流失的主要驱动力。

(3)不同形态的氮对于农业非点源污染的意义有显著不同,其流失规律也存在显著差异。主要原因可能是当雨强较小时,雨水能够充分入渗从而产生浸提作用,N 的流失以蓄满产流为主,以蓄满产流为主的 DN 占 TN 的比例较高;雨强比较大时是以超渗产流为主,超渗产流则是以物理侵蚀为主,PN 含量较高^[24-25]。

4 结论

(1)三大流域径流小区径流系数及泥沙流失速率大小顺序为:暴雨>大雨>中雨。相同雨强条件下,径流系数万泉河与南渡江相近,昌化江最小;泥沙流失速率大小顺序为:万泉河>南渡江>昌化江。

(2)雨强对 TP 流失速率的影响达到极显著水平,三大流域区 P 随径流流失以 PP 为主;三大流域区 N 在雨强较小时以 DN 流失为主,当达到暴雨时以 PN 流失为主。

(3)随径流液流失的 COD、TN、DN、PN 和随泥沙流失携带的总氮、总磷和有机质的流失与地表径流流失规律一致,雨强越大,流失速率越快,且泥沙流失携带总氮、总磷和有机质的流失速率增幅相近;在同一雨强条件下,三流域区有机质、总氮和总磷随泥沙携带流失速率为:昌化江>万泉河>南渡江。

(4)三流域在降雨条件下,营养物质以径流携带流失为主,泥沙携带流失也是养分流失的主要途径之一,改变施肥方式及控制施肥量是防止养分流失的关键。

(5)影响面源流失的主要因素为:坡度、雨强、土质等。

表 6 水土流失强度指标与其影响因素的相关系数

Table 6 Strength index of soil erosion and correlation coefficient of their influencing factors

处理	径流系数	泥沙流失速率	泥沙有机质 流失速率	泥沙总氮 流失速率	泥沙总磷 流失速率	COD 流失速率	TN 流失速率	TP 流失速率	备注
坡度	0.35**	0.65**	0.74**	0.68**	0.62**	0.25	0.31*	0.17	n=20
覆盖率	0.01	0.03	0.06	0.02	0.04	-0.32*	-0.03	-0.11	
土壤含水量	-0.12	0.00	-0.08	-0.08	0.03	-0.16	-0.06	-0.19	
雨强	0.96**	0.95**	0.88**	0.82**	0.90**	0.89**	0.95**	0.81**	

注:“*”和“**”分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

参考文献:

- [1] Ranjith P U dawatta, Peter P M otavalli. Nitrogen losses in runoff from three adjacent agricultural watersheds with claypan soils[J]. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 2006, 117: 39-48.
- [2] R richard Lowerance, Robert L Todd. Nutrient cycling in an agricultural watershed: II. Stream flow and artificial drainage[J]. *J Environ Qual*, 1984, 13(1): 27-32.
- [3] 魏林宏, 张 斌, 程训强. 水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(9): 1145-1150.
WEI Lin-hong, ZHANG Bin, CHENG Xun-qiang. Effects of hydrological factors on nitrogen loss in small agricultural catchments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(9): 1145- 1150.
- [4] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律[J]. *环境科学*, 2004, 25(6): 108-112.
HU Yuan-an, CHENG Sheng-tong, JIA Hai-feng. Regular pattern of non-point source pollutants losses in Luxi watershed[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 108- 112.
- [5] 张荣保, 姚 琪, 计 勇, 等. 太湖地区典型小流域非点源污染物流失规律[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 94- 98.
ZHANG Rong-bao, YAO Qi, JI Yong, et al. A study on law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Taihu basin: A case study at Meilin watershed in Yixing City of Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14 (1): 94- 98.
- [6] 张荣社, 周 琪, 史云鹏, 等. 滇池流域农业区的暴雨径流特征研究[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(2): 13- 16.
ZHANG Rong-she, ZHOU Qi, SHI Yun-peng, et al. Study on storm runoff characteristics in agricultural area in the Dianchi Valleys [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(2): 13- 16.
- [7] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 326- 331.
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 326-331.
- [8] 杨丽霞, 桂桂山, 苑韶峰. 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[J]. *环境科学学报*, 2007, 28(8): 1763-1769.
YANG Li-xia, YANG Gui-shan, YUAN Shao-feng. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu basin[J]. *Chinese Journal of Environment Science*, 2007, 28(8): 1763-1769.
- [9] 蒋 锐, 朱 波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1353-1358.
JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jia-liang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall-runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1353-1358.
- [10] 李恒鹏, 金 洋, 李 燕. 模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 6-9.
LI Heng-peng, JIN Yang, LI Yan. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farmland under artificial rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 6-9.
- [11] 庾 刚, 李恒鹏, 金 洋. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 45-52.
TUO Gang, LI Heng-peng, JIN Yang. Characteristics of phosphorus transfer in farmland under artificial rainfall conditions [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 45-52.
- [12] 景 可. 海南岛土壤侵蚀浅谈[J]. *中国水土保持*, 1982, (4): 11-14.
JING Ke. Soil erosion on Hainan Island[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1982, (4): 11-14.
- [13] 肖 寒, 欧阳志云, 王效科. GIS 支持下的海南岛土壤侵蚀空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 1999, 5(4): 66-72.
XIAO Han, OUYANG Zhi-yun, WANG Xiao-ke. Spatial distribution characteristics of soil erosion in Hainan Island by GIS[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1999, 5(4): 66-72.
- [14] 赵玉国, 张甘霖, 龚子同. SOTER 支持下海南岛土壤侵蚀模拟与影响因子分析[J]. *土壤通报*, 2003, 34(3): 219-224.
ZHAO Yu-guo, ZHANG Gan-lin, GONG Zi-tong. SOTER-dased soil water erosion simulation and contribution factor analysis in Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3): 219-224.
- [15] 周祖光. 海南岛河流水体纳污分析[J]. *资源科学*, 2006, 28(6): 141-145.
ZHOU Zu-guang. Analyzing pollutant taking capacity of rivers in Hainan[J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 141-145.
- [16] 曹艳红, 于传龙, 符致效. 昌化江地面水源水质卫生学调查[J]. *中国热带医学*, 2006, 6(1): 152-154.
CAO Yan-hong, YU Chuan-long, FU Zhi-xiao. Hygienic survey of water quality of Changhuajiang River[J]. *China Tropical Medicine*, 2006, 6(1): 152-154.
- [17] 曹艳红, 于传龙, 符致效. 海南省南渡江地面水源水质卫生学调查[J]. *中国热带医学*, 2003, 3(6): 827-829.
CAO Yan-hong, YU Chuan-long, FU Zhi-xiao. Hygienic inspection of ground water quality of Nandujang River in Hainan[J]. *China Tropical Medicine*, 2003, 3(6): 827-829.
- [18] 于传龙, 曹艳红, 符致效. 万泉河地面水源水质卫生学调查[J]. *中国热带医学*, 2005, 5(9): 1922-1923.
YU Chuan-long, CAO Yan-hong, FU Zhi-xiao. Hygienic survey of water quality of Wanquanhe River in Hainan Province[J]. *China Tropical Medicine*, 2005, 5(9): 1922-1923.
- [19] 杨丽霞, 桂桂山. 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[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1763-1769.
YANG Li-xia, YANG Gui-shan. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable Plot of Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1763-1769.
- [20] 甄 兰, 廖文华, 刘建玲. 磷在土壤环境中的迁移及其在水环境中的农业非点源污染研究[J]. *河北农业大学学报*, 2005, 25: 55-59.
ZHEN Lan, LIAO Wen-hua, LIU Jian-ling. A study on phosphorus movement in soil and phosphorus pollution from agricultural non-point sources in water environment[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2005, 25: 55-59.

- [21] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R. The transportation of bioavailable phosphorous in agriculture runoff[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, 21:30–35.
- [22] 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.
YANG Jin–ling, ZHANG Gan–lin. Characteristics of nitrogen and phosphorus discharge with runoff from a watershed in the northern sub-tropical low hilly areas[J]. *Rural Eco–Environment*, 2005, 21(3):34–37.
- [23] 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.
CHEN Xin, WANG Zhao–qian, YANG Wu–de. Effects of sloping land use patterns on phosphorus loss in a micro–watershed of red soil area, Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3):374–377.
- [24] 吴希媛, 张丽萍, 张妙仙. 不同雨强下坡地氮流失特征[J]. 生态学报, 2007, 27(11):4576–4582.
WU Xi–yuan, ZHANG Li–ping, ZHANG Miao–xian. Research on characteristics of nitrogen loss in sloping land under different rainfall intensities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11):4576–4582.
- [25] 张丽萍, 张妙仙. 土壤侵蚀正态模型实验中产流畸变系数[J]. 土壤学报, 2000, 37(4):449–455.
ZHANG Li–ping, ZHANG Miao–xian. Research on runoff formation distortion coefficient in soil erosion experiment of a normal model of small drainage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):449–455.
- [26] 梁 涛, 王红萍, 张秀梅. 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.
LIANG Tao, WANG Hong–ping, ZHANG Xiu–mei. Simulation study of non–point source pollution under different land use in Guan Ting Reservoir watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4):483–490.
- [27] 单宝庆, 尹澄清, 于 静. 降雨–径流过程中表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境学报, 2001, 21(1):7–12.
SHAN Bao–qing, YIN Cheng–qing, YU Jing. Study on phosphorus transport in the surface layer of soil with rainfall simulation method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(1):7–12.