

海南岛农田面源污染在生物气候区分布上的特征研究

周石池^{1,2}, 宋玉梅¹, 王 瑞¹, 唐文浩^{1,2*}

(1.海南大学热带作物种质资源保护与开发利用教育部重点实验室,海口 570228; 2.海南大学环境与植物保护学院,海口 570228)

摘 要:农业面源污染已成为中国首要环境问题,其污染范围广,污染后果严重。理清农业面源污染的地域分布规律,对合理制定农业面源污染防治措施具有特别重要的意义。以海南主岛为研究区域,采用农田径流场结合人工模拟降雨的方法,研究在生物气候分区上农田面源污染物输出系数及特征。结果表明:海南岛不同生物气候区差异对于土壤径流系数大小的影响程度,表现为半湿润区>湿润区>潮湿区>半干旱区;半湿润区、潮湿区和湿润区存在潜在的水土流失问题;氮素与磷素分别主要以随径流和泥沙的方式迁移;暴雨强度显著增加了污染物的流失速率。

关键词:模拟降雨;生物气候分区;产流产沙;养分流失;特征

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1660-09

Characteristics of Agricultural Non-point Source Pollution in Bio-climatic Division in Hainan Island, China

ZHOU Shi-chi^{1,2}, SONG Yu-mei¹, WANG Rui¹, TANG Wen-hao^{1,2*}

(1.Key Laboratory of Education Ministry of Tropical Crop Germplasm Resources Protection and Utilization of Hainan University, Haikou 570228, China; 2.College of Environment and Plant Protect of Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Agricultural non-point pollution widely spreads and has led to a serious environment problem in the larger area of China. Better understanding of the geographical distribution of agricultural non-point pollution is vital to establish reasonable control measures for alleviating the issue. This paper studied the output coefficient and characteristics of agricultural non-point pollution in different bio-climatic division using method of simulative rainfall combined with farmland runoff plots in Hainan Island. The results suggested that; (1)soil runoff coefficient varied with bio-climatic division and was observed in semi-moist region then followed by moist region, damp region and semi-arid region sequentially; (2)potential soil erosion existed in semi-moist region, damp region and moist region; (3)soil nitrogen in field was mainly lost through surface runoff, while it was through sediment loss for phosphorus; (4)rainstorm($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) could significantly increase erosion rate of pollutants.

Keywords: artificial rainfall; bio-climatic division; produces flows and the sand; nutrient outflow; characteristics

20 世纪 60 年代,欧美发达国家在治理湖泊和海湾水体富营养化时发现,流域点源污染得到有效控制后,湖泊、海湾水质并没有得到有效改善,仍有进一步恶化的趋势,研究表明恶化趋势来自农业面源污染,并由此引发了全社会的关注^[1-3]。当前,农业面源污染是导致水体污染最主要原因之一,如美国受污染的河流中,有 59%的河段是由农业面源污染造成的;农业面源污染的总氮、总磷分别占荷兰水环境污染总量的 60%和 40%;农业面源排放的磷素和氮

素占芬兰总排放量的 50%以上。农业面源污染问题已经严重地威胁了人类生产、生活用水的安全,已成为当前国际环境污染控制的热点。农业面源由于污染分布面积广,污染的产生在空间上、时间上的不确定性,成为全世界共同面临的环境难题和实现水质控制的关键^[4-9]。当前,我国农业面源污染的现状比较严重,2007 年农业面源污染排放的总氮为 270.46 万 t,总磷为 28.47 万 t,分别占同期全国排放的 57.19%和 67.27%^[10-11],环境研究者和管理层逐渐认识到,农业面源污染已成为我国水体水质恶化的主要污染源,要从根本上解决我国的水环境污染问题,必须处理好农业面源污染问题。

我国农业面源污染研究起步较晚,只在局部区域做过一些工作,目前缺乏系统、可靠的基础资料,有关

收稿日期:2011-01-11

基金项目:海南省国土环境资源厅“海南省农业污染调查及防治对策研究”项目

作者简介:周石池(1985—),男,湖南耒阳人,硕士研究生,主要从事生态环境研究。E-mail:chishizhou@163.com

* 通讯作者:唐文浩 E-mail:tw1229@163.com

污染源的状况,面源污染对河流、湖泊等水体污染的贡献情况基本处于空白状态^[12-16]。随着海南省农村经济的快速发展,农业污染也在快速扩展,农业污染已是造成海南地表水水质下降的主要原因之一,甚至关系到农业及区域社会经济的可持续发展,防治农业污染已成为海南环境保护工作的重点。

本研究采用人工模拟降雨器和人工径流场结合的方法、从生物气候分区的空间上研究海南岛农业面源污染物空间迁移规律和污染物输出特征,以期获得海南面源污染的基础性资料,为海南省农业环境污染防治提供技术支持和决策依据。

1 实验与方法

1.1 研究区概况

海南岛属热带季风海洋性气候,基本特征为:四季不分明,夏无酷热,冬无严寒,气温年差较小,年平均气温高;干、雨季明显,多热带气旋,风、旱、寒等气候灾害频繁。海南岛年平均气温 22.5~25.6 ℃,年日照时数 1 780~2 600 h, 太阳总辐射量 4 500~5 800 MJ·m⁻², 年降水量 1 500~2 500 mm(西部沿海约 1 000 mm), 全年湿度大,年平均水汽压约 23 hPa(琼中)至 26 hPa(三亚)^[17-21]。

自然降水对土壤表层的冲刷是引起水土流失与产生农田面源污染的主要驱动力。由降水引起的径流是土壤侵蚀和溶质迁移的原动力,降雨条件下表层土壤中的植物营养素因雨滴击溅和冲刷作用,随地表径流迁移流入接纳水体,引起水体的富营养化或污染,从而造成农业面源污染问题。根据海南岛年降雨量、干燥度、旱季的长短等可将全岛划分成潮湿区、湿润区、半湿润区和半干旱区 4 个生物气候类型^[22-27](见表 1^[28])。本文将从生物气候分区角度研究海南岛农田面源污染的特征及其规律。

1.2 实验设计

我国在农业面源方面研究起步较晚,现有的工作

在很大程度上借鉴国外的经验和方法,但目前这些方法的产生背景和适用条件可能和我国的情况有很大的不同,如果不加以注意和区别地运用将会导致计算结果错误。本研究项目采用农业污染源普查、农田径流场结合人工降雨模拟研究方法、输出系数与模型预测分析法去建立模拟模型,进行时间序列和空间尺度的模拟计算农田面源污染负荷,从而避免了因借鉴国外的经验和方法适用条件和缺乏基础资料造成的结果差异较大的弊端。

径流场是研究坡面径流、泥沙及其污染物迁移转化过程的主要方法之一,本研究采用农田径流场结合人工模拟降雨的方法,在海南岛不同生物气候分区上及各种降雨条件下,探讨农田面源污染物分布水平及特征、规律^[29-31]。本项目采用准网格布点法布置径流观测场,即在考虑不同地表类型特点的基础上在空间上尽量分布均匀,并能包含各主要影响因素。径流观测场布点原则:①依据气候分区:西部半湿润区、北部湿润区、东中部潮湿区、西南部半干旱区 4 个气候类型区;②依据地形坡度分区:中部山地区、丘陵山区、丘状台地区、平原台地区 4 个类型;③依据成土母质类型:花岗岩、砂页岩、玄武岩、海积物和冲积物类型;④依据土壤类型:花岗岩砖红壤、玄武岩砖红壤、燥红壤、水稻土、砂页岩砖红壤等;⑤依据土地利用类型:一年生作物类和多年生作物类,如水稻(一年生作物)、蔬菜(一年生作物、旱地)、果树(多年生作物、旱地)等;⑥依据土壤特性分类:砂土、壤土、粘土;⑦依据植被覆盖率大小(<30、30~60、>60 三个类型)观测场选点同时考虑河流、水库等敏感位置,整体上考虑大地形的布局结构。

根据以上原则和依据在全岛依准网格法布置 31 个的径流场,潮湿区设置 11 个径流观测场;湿润区设置 13 个径流观测场;半湿润区设置 4 个径流观测场;半干旱区设置 3 个径流观测场。每个径流场观测 3 个典型降雨量(中、大、暴雨)。见图 1。

表 1 海南岛生物气候分区标准和主要分布地区

Table 1 Standard and the main distribution area in bio-climatic division in Hainan Island

主要分布地区 Division	类型 Type	年降雨量/mm Annual precipitation	干燥度 Dryness	月雨量<50mm/ 月数 Monthly rainfall
中部、东部迎风面 Central, Eastern windward side	潮湿 Damp	>2 000	<0.7	2~3
东北部、北部平原、阶台地 The northeast, the northern plains, order platform	湿润 Moist	1 600~2 000	0.7~0.85	3~4
西北、西南部丘陵、台地 Northwest, Southwest hills, platform	半湿润 Semi-moist	1 200~1 600	0.85~1.2	4~5
西南、西北部沿海阶、台地 The southwest and northwest coast order and the platform	半干旱 Semi-arid	<1 200	>1.2	>5

注:资料来源于《海南土壤》,海南省农业厅土肥站,1994,海南出版社、三环出版社。

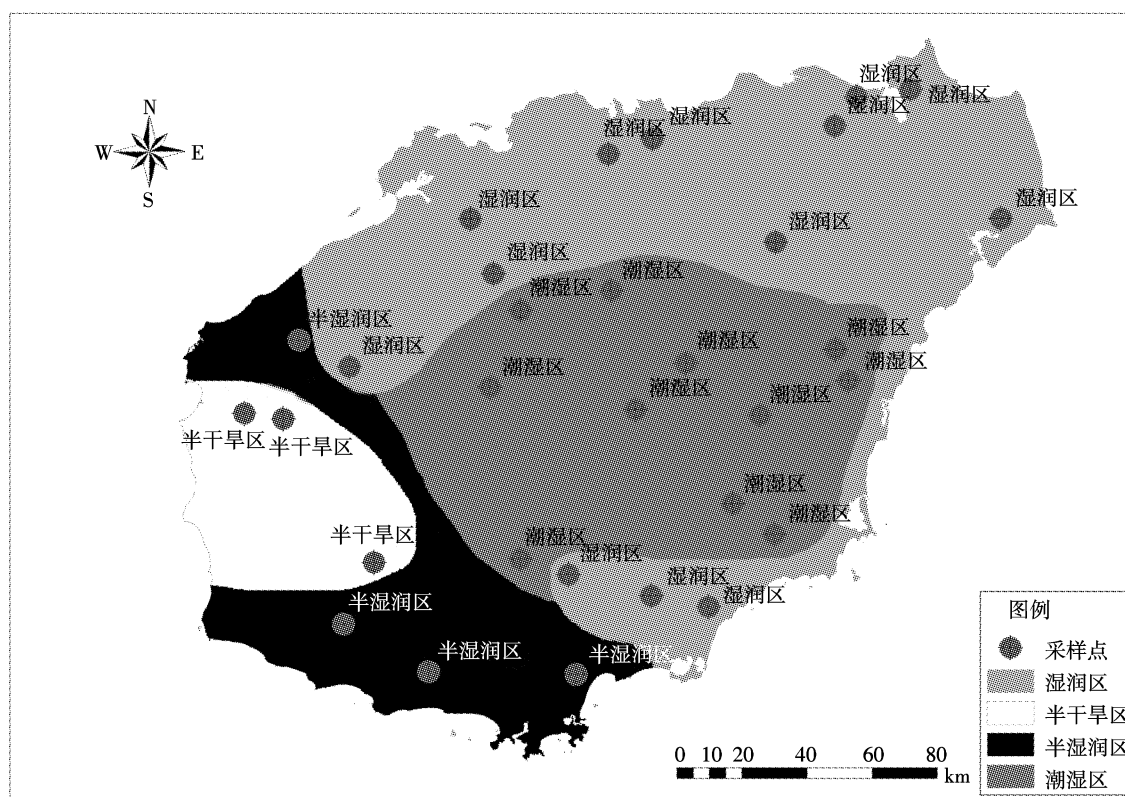


图 1 海南岛生物气候类型分区布点示意图

Figure 1 Distribute sketch map of stationing in bio-climatic division in Hainan Island

径流场的尺寸通常为 $5\text{ m} \times 4\text{ m}$, 降雨高度 4 m , 并可以根据研究地区的实际情况如坡度、坡长、土壤等作适当的调整, 四周用 0.4 m 的 PVC 板围住, 插入土壤 0.2 m 外露 0.2 m , QYJY-502 便携式全自动不锈钢模拟降雨器专门模拟仿自然降雨, 配有称重式雨量计。雨强设为: 中雨强度 $1.00\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 大雨强度 $1.65\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 暴雨强度 $2.55\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。同一降雨历时 10 min 左右, 观测与监测产流产沙过程。

1.3 实验测试及数据处理方法

1.3.1 实验观测

利用称重式雨量计观测整个降雨过程, 采用体积法实时监测径流过程并使用容积 500 mL 的玻璃瓶采集径流水样, 利用室内实验室研究的条件测定其污染物的浓度, 每个参数重复 3 次, 取平均值。

待地表径流结束后, 依据径流收集池的泥沙含量采用燃烧法估算土壤流失量。

1.3.2 测试方法

径流液总磷(TP)采用过硫酸钾氧化, 钼锑抗比色法测定; 径流液总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; 土壤全磷(TP)采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法-钼锑抗比色法; 土壤全氮(TN)采用半微量开氏法。

1.3.3 数据处理方法

输出系数模型和许多复杂的机理模型都依赖于污染物输出系数来估算大流域污染的产生和输移, 另外输出系数在很大程度上反映了区域非点源污染输出强度, 本研究采用模拟降雨和田间尺度监测的方法确定了不同土地利用类型的非点源污染物输出系数, 再将模拟降雨和田间尺度监测得到的非点源污染物输出系数与区域尺度监测得到的径流系数进行统筹分析来估算流域非点源污染输出强度。

本研所得数据均采用 Excel 和统计软件 DPS6.55 进行二因素有重复的试验统计分析, 在 95% 置信水平下, 借助最小差异显著法 LSD 进行多重比较分析, 每个径流场试验 3 次, 试验结果有 3 个重复。

2 结果与分析

2.1 生物气候分区差异对地表径流系数和土壤流失速率的影响

2.1.1 地表径流系数和土壤流失速率

图 2 表明不同生物气候区土壤径流系数随降雨强度的变化过程, 发现不同生物气候区的土壤径流系数明显不同, 在不同降雨强度下, 土壤径流系数呈现

一定的规律,具体表现为:半湿润区>湿润区>潮湿区>半干旱区,并且随着雨强的增大,径流系数明显增加,如在半干旱气候区,地表径流系数从中雨的11.85%增加到暴雨的33.76%,增大2.9倍。

图3表明不同生物气候区土壤流失速率随降雨强度的变化过程,发现不同生物气候区的土壤流失速率明显不同,在不同降雨强度下,土壤产流系数呈现一定的规律,具体表现为:半湿润区>潮湿区>湿润区>半干旱区,并且随着降雨强度的增大,产流系数明显增加,在半干旱气候区,土壤泥沙流失速率从中雨的 $240.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到暴雨的 $1\,230.52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,增大5.1倍。

综合上述,径流系数和土壤泥沙流失速率在半湿润气候区最高,并且与降雨强度呈现正相关性。其中径流系数(y)与降雨强度(x)相关系数为0.60,相关方程:

$$y=18.991x+4.4505(R^2=0.3561)$$

土壤流失速率(y)和降雨强度(x)相关系数为0.53,相关方程为:

$$y=998.98x-654.4(R^2=0.2806)$$

2.1.2 地表径流系数和土壤流失速率与生物气候区的关系

利用DPS6.55软件进行二因素有重复的试验统计分析,并借助最小差异显著法LSD进行多重比较得出:土壤径流系数在半湿润区、潮湿区、半干旱区之间达到显著性差异,并且不同雨强之间也存在显著性差异;土壤流失速率在半湿润区与湿润区、半干旱区达到显著性差异,并且在暴雨的雨强下,流失速率增长差异显著。

根据土壤流失速率计算出不同降雨条件下各生物气候区的土壤流失负荷量,如表2所示。以美国推荐值($4\sim 11.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和中国参考值($2\sim 10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)作为标准来评价海南岛农业土壤流失量,半干旱区在3种降雨强度下的土壤流失量均在土壤允许流失量指标的平均值以下,而在暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),半湿润区、潮湿区、湿润区的土壤流失量均超过了土壤允许流失量指标的平均值,与前人研究相吻合^[32]。

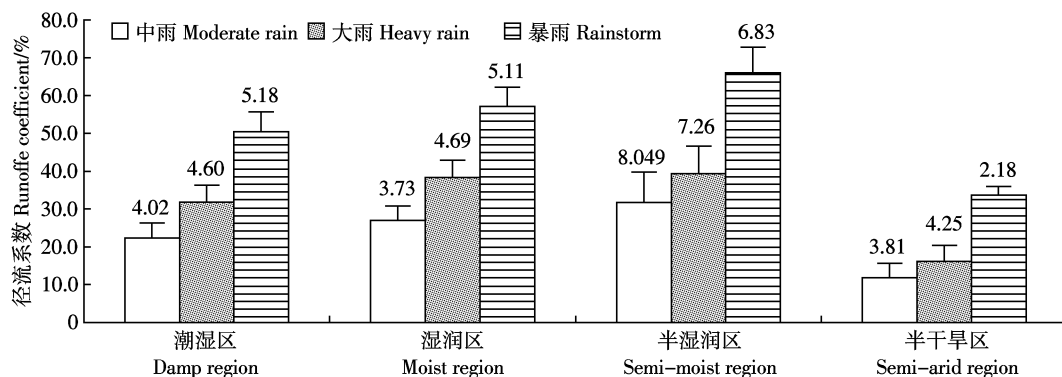


图2 不同降雨强度下各生物气候类型区土壤径流系数的比较

Figure 2 Compare runoff coefficient under different rainfall intensities in bio-climatic division

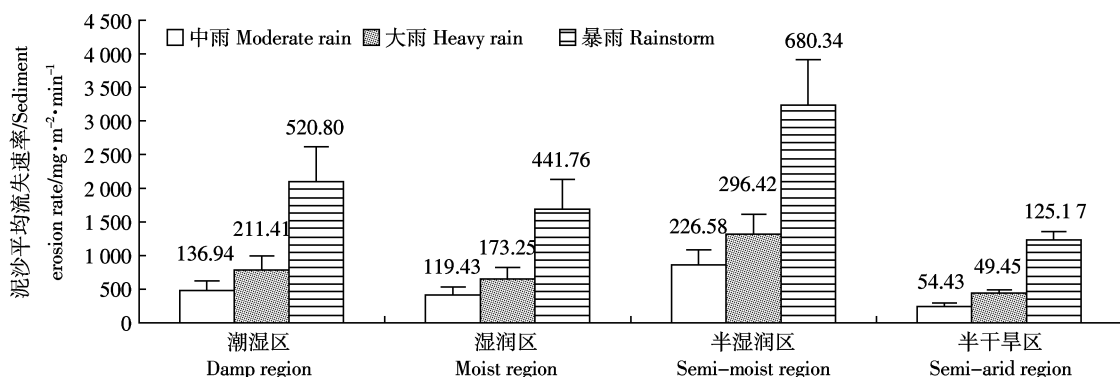


图3 不同降雨强度下各生物气候类型区地表径流中泥沙流失速率的比较

Figure 3 Compare sediment erosion rate under different rainfall intensities in bio-climatic division

表2 不同降雨条件下各生物气候区土壤流失量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)Table 2 Amount of soil loss under different rainfall intensities in bio-climatic division ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

生物气候区	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	暴雨 Rainstorm
潮湿区 Damp region	2.14~2.62	2.95~3.54	8.04~9.79
湿润区 Moist region	1.66~2.03	2.21~2.65	5.84~7.10
半湿润区 Semi-moist	2.67~3.27	3.48~4.17	8.68~10.57
半干旱区 Semi-arid	0.64~0.78	1.00~1.20	2.83~3.45

2.2 生物气候分区差异对农田总氮流失速率的影响

2.2.1 总氮流失速率

图4表明不同生物气候分区泥沙中总氮(TN)流失速率随降雨强度的变化过程,发现生物气候分区对泥沙中总氮(TN)流失速率影响呈现一致趋势与规律。在不同降雨强度下,泥沙总氮(TN)流失速率的规律表现为半湿润区>潮湿区>半干旱区>湿润区,同时雨强增大,流失速率也增加,表现为暴雨>大雨>中雨,暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)半湿润区泥沙总氮(TN)流失速率达到 $2.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,为中雨强度下的200%。

图5表明不同生物气候区对于径流中总氮(TN)流失速率影响随着降雨强度的不同呈现不同的规律。虽然规律性不显著,但随着雨强增大,流失速率增加,暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)半湿润区径流总氮(TN)流失速率达到 $9.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,是中雨强度下的753%。

2.2.2 总氮流失速率与生物气候分区的关系

经比较得出,半湿润区的泥沙中总氮(TN)流失速率最高,并与潮湿区、湿润区、半干旱区有显著性差异,后三者的流失速率各有不同,但没有达到显著水平,暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),各区流失速率显著性增加;径流中总氮(TN)流失速率在不同降雨强度下表现为不同,发现半湿润区与半干旱区之间存在显著性差异,暴雨条件下,流失速率达到显著性增加。

综合以上分析可得,在暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),泥沙和径流中总氮的流失速率(y)有显著性增长,说明雨强(x)对总氮素的流失有密切的关联,相关系数为0.74。相关方程:

$$y = 3.64x - 2.7698 (R^2 = 0.5423)$$

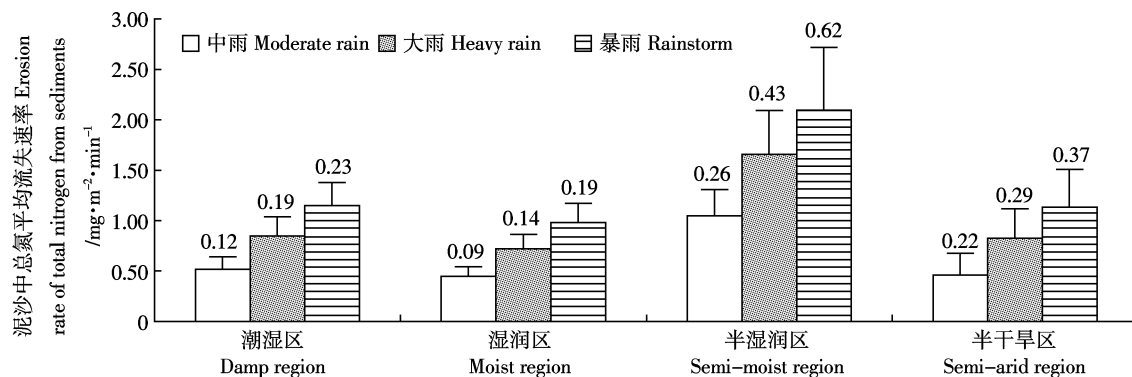


图4 不同降雨强度下各生物气候类型区泥沙中总氮流失速率的比较

Figure 4 Compare erosion rate of total nitrogen from sediments under different rainfall intensities in bio-climatic division

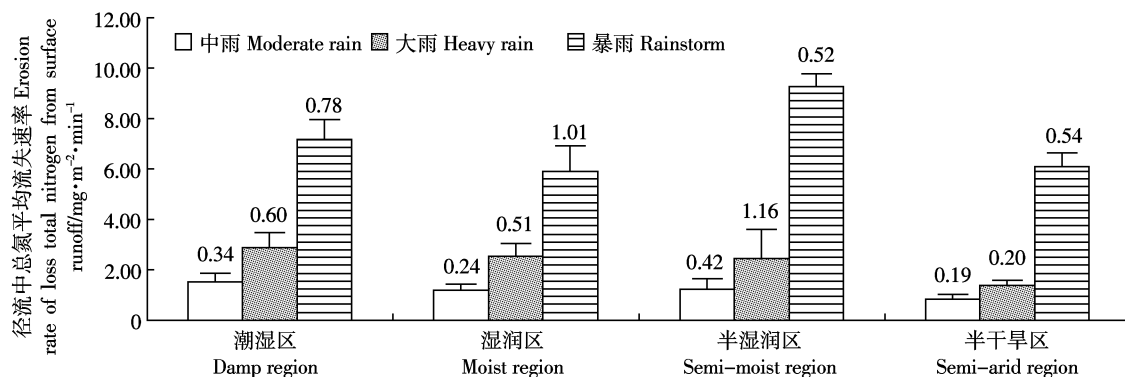


图5 不同降雨强度下各生物气候类型区径流中总氮流失速率的比较

Figure 5 Compare erosion rate of total nitrogen from surface runoff under different rainfall intensities in bio-climatic division

图6~图8表明,在整个氮素的流失过程中,径流中总氮流失基本占总氮流失的一半以上,雨强越大,

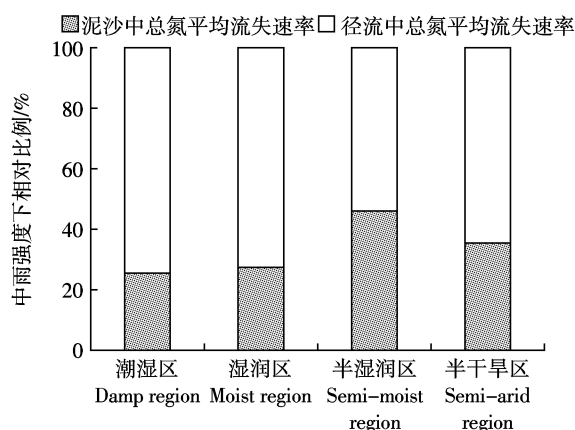


图6 中雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总氮流失相对比例

Figure 6 Relative proportions between total nitrogen from sediments and surface runoff in moderate rain in bio-climatic division

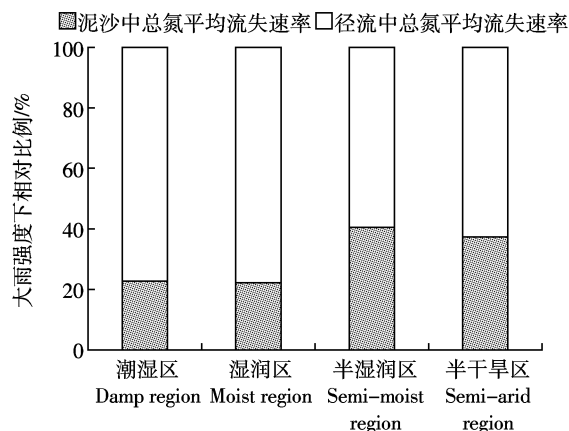


图7 大雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总氮流失相对比例

Figure 7 Relative proportions between total nitrogen from sediments and surface runoff in heavy rain in bio-climatic division

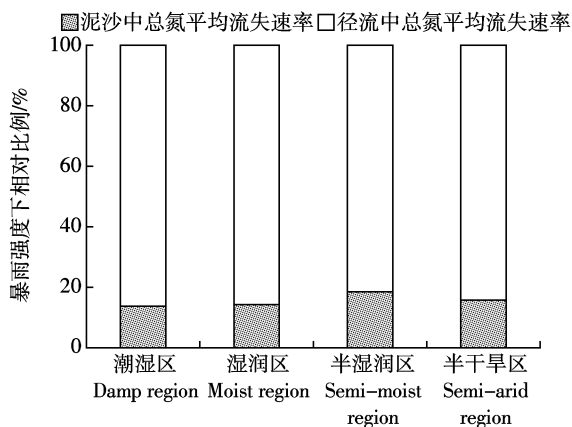


图8 暴雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总氮流失相对比例

Figure 8 Relative proportions between total nitrogen from sediments and surface runoff in rainstorm in bio-climatic division

其所占比例越大,中雨条件下半湿润区径流总氮流失占总氮流失的64.5%,暴雨条件下猛增到84.3%,说明农业面源污染中地表径流是氮素流失的主要方式,径流中氮素流失和雨强关系紧密,同时径流总氮流失占总流失比例呈现一致的趋势:潮湿区>湿润区>半干旱区>半湿润区。

2.3 生物气候分区差异对农田总磷流失速率的影响

2.3.1 总磷流失速率

图9表明不同生物气候分区泥沙中总磷(TP)随降雨强度的变化过程,发现不同生物气候分区对泥沙中总磷(TP)流失速率影响呈现一致规律,在不同降雨强度下,泥沙总磷(TP)流失速率规律表现为半湿润区>潮湿区>湿润区>半干旱区,同时雨强增大,流失速率相应也增加,暴雨条件下($2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),半湿润区泥沙总磷(TP)流失速率达到 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,是中雨强度下的203%。

图10表明不同生物气候区对于径流中总磷(TP)流失速率影响规律和泥沙中总磷(TP)流失速率规律一致,表现为半湿润区>潮湿区>湿润区>半干旱区,雨强增大,流失速率也增加,暴雨强度下潮湿区径流总磷(TP)流失速率达到 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,是中雨强度的187%。

2.3.2 总磷流失速率与生物气候分区的关系

经比较得出,半湿润区泥沙中总磷(TP)流失速率最高,并与潮湿区、湿润区、半干旱区有显著性差异,后3个分区流失速率各有不同,但湿润区与半干旱区之间没有显著性差异,同时雨强增大,其流失速率显著性增长。对径流液总磷(TP)流失速率比较分析可知,各生物气候分区之间差异不显著,径流中总磷(TP)流失速率在不同降雨强度下各有差异,但没有达到显著性水平,可能是径流中磷素的流失与其在环境中的状态有关。

图11~图13表明,泥沙中总磷(TP)流失占总磷流失的大部分。大雨条件下泥沙中总磷(TP)流失占总流失比例最大,中雨条件下半潮湿区径流总磷(TP)流失占总流失的65.4%,即农业面源污染中泥沙携带是磷素流失的主要方式。至于磷素流失具体机理,尚有待进一步研究。

3 结论

(1)海南岛不同生物气候区差异对于土壤径流系数大小的影响程度表现为半湿润区>湿润区>潮湿区>半干旱区,数据表明暴雨条件下半湿润区的土壤

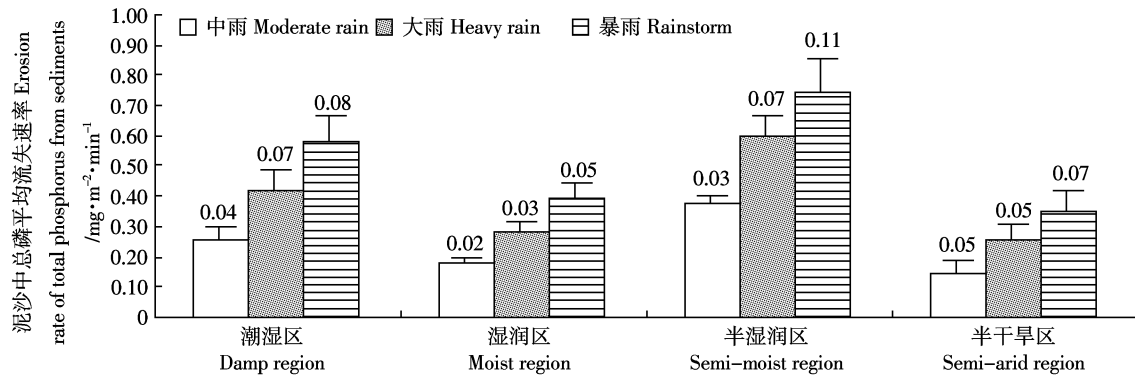


图 9 不同降雨强度下各生物气候类型区泥沙中总磷流失速率的比较

Figure 9 Compare erosion rate of total phosphorus from sediments under different rainfall intensities in Bio-climatic Division

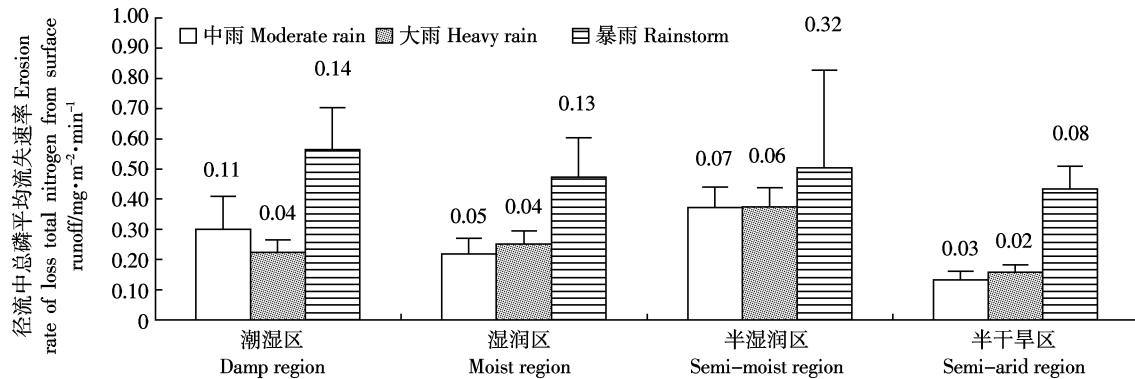


图 10 不同降雨强度下各生物气候类型区径流中总磷流失速率的比较

Figure 10 Compare erosion rate of total phosphorus from surface runoff under different rainfall intensities in bio-climatic division

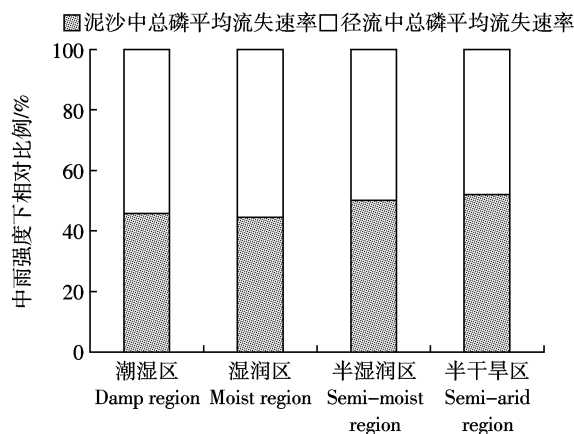


图 11 中雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总磷流失相对比例

Figure 11 Relative proportions between total phosphorus from sediments and surface runoff in moderate rain in bio-climatic division

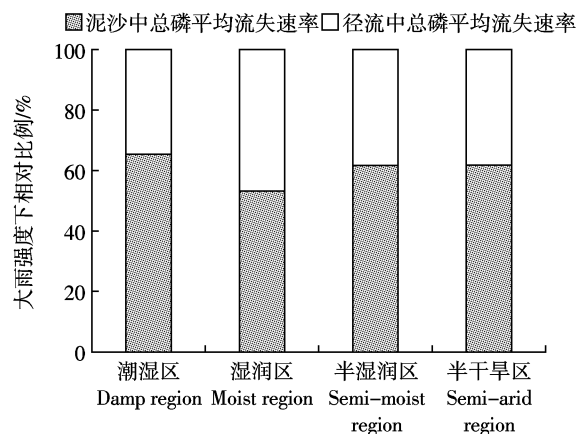


图 12 大雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总磷流失相对比例

Figure 12 Relative proportions between total phosphorus from sediments and surface runoff in heavy rain in bio-climatic division

径流系数高达 65.96%。

(2)在暴雨 $2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,半湿润区、潮湿区和湿润区的土壤流失量均超过了土壤允许流失量指标的平均值。

(3)地表径流为氮素流失的主要迁移形式,径流中氮素流失占总流失的一半以上;磷素的迁移主要随泥沙流失,空间生物气候分区对泥沙中总磷的流失有显著影响。

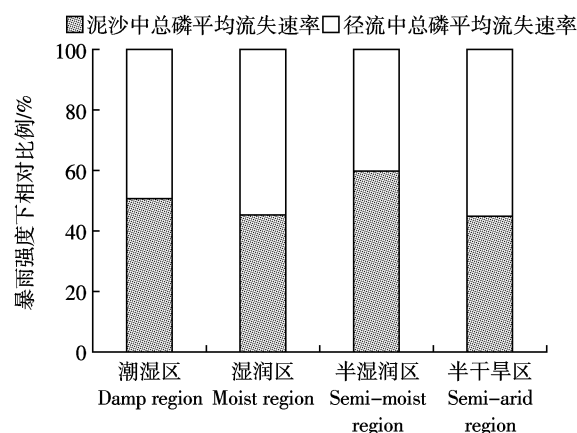


图13 暴雨强度下各生物气候区泥沙与径流中总磷流失相对比例

Figure 13 Relative proportions between total phosphorus from sediments and surface runoff in rainstorm in bio-climatic division

(4)半湿润区产流产沙、氮磷流失速率各项参数在分区中最高,暴雨 $2.55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下,流失速率显著性增加。

4 建议

(1)结合考虑海南降雨比较集中、年均降雨强度大、暴雨日数多和地形地貌起伏大的特点,推测半湿润区、潮湿区和湿润区这3区域存在潜在的水土流失问题,应注意做好水土流失防治工作。

(2)半湿润区农业面源污染最严重,对半湿润区的管理和控制是做好整个海南岛农业面源污染控制的关键。

参考文献:

- [1] 李廷友,林振山,谢标. 农业面源污染现状与治理对策探讨[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6):2705-2707.
LI Ting-you, LIN Zhen-shan, XIE Biao. Status and countermeasures of agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(6):2705-2707.
- [2] X Biao, L Tingyou, W Xipe, et al. Variation in the water quality of organic and conventional shrimp ponds in a ccoastal environment from Eastern China[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2009, 15(1): 47-59.
- [3] Bekiaris I G, Panagopoulos I N, Mimikou M A. Application of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model in the Ronnea Catchments of Sweden[A]. *Global NEST Journal*, 2005, 7(3):252-257.
- [4] 宋维峰,王克勤. 面源污染防治研究现状与对策[M]. 北京:九州出版社, 2008:267-274.
SONG Wei-feng, WANG Ke-qin. Non-point source pollution prevention research present situation and countermeasures[M]. Beijing: Jiu Zhou Press, 2008:267-274.
- [5] Behera S, Panda R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1-4):62-72.
- [6] 宋家永,李英涛,宋宇,等. 农业面源污染的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11):362-365.
SONG Jia-yong, LI Ying-tao, SONG Yu, et al. Research and prospect on non-point pollution from agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(11):362-365.
- [7] 卞辑部. 美国如何治理农业面源污染[J]. 北京农业, 2009(1):50.
- [8] Leon L F, Booty W G, Bowen G S, et al. Validation of an agricultural non-point source model in watershed in Southern Ontario[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65:59-75.
- [9] Andrea R, Enrico B, Gianluca B. Nonpoint source transport models from empiricism to coherent theoretical frameworks[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 184:19-35.
- [10] 耿士均,陆文晓,王波,等. 农业面源污染的现状与修复[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25):13993-13996.
GEN Shi-jun, LU Wen-xiao, WANG Bo, et al. The status and restoration of Agricultural Non-point source pollution[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(25):13993-13996.
- [11] 叶华香,李明. 农业面源污染问题及其防治对策研究[C]//全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集,昆明:中国农学会, 2004:30-33.
YE Hua-xiang, LI Ming. Countermeasures for control and prevention of Multiple Area-pollution in Agriculture [C]//National Agricultural Non-point Source Pollution and International Conference on Comprehensive Prevention and Control. Kunming:China Association of Agricultural Science Societies, 2004:30-33.
- [12] 杨林章,王德建,夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, 20:29-30.
YANG Lin-zhang, WANG De-jian, XIA Li-zhong. Features and ways of control of non-point agricultural pollution in Taihu Area [J]. *China Water Resources*, 2004, 20:29-30.
- [13] 万超,张思聪. 基于GIS的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. 水力发电学报, 2003, 2:62-68.
WAN Chao, ZHANG Si-cong. Calculation of non-point source pollution loadings for the Panjiakou Reservoir based on GIS[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2003, 2:62-68.
- [14] 王晓燕,王一岫,王晓峰. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1):30-33.
WANG Xiao-yan, WANG Yi-xun, WANG Xiao-feng. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun Reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1):30-33.
- [15] 吕唤春,陈英旭,方志发. 千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):91-93.
LU Huan-chun, CHEN Ying-xu, FANG Zhi-fa. Effect of sloping land use pattern on nitrogen and phosphorus loss in Qiandaohu Watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2):91-93.
- [16] 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.
- [17] 张黎明, 魏志远, 漆智平. 近30年海南不同地区降雨量和蒸发量分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 403-407.
- ZHANG Li-ming, WEI Zhi-yuan, QI Zhi-ping. Characteristics of rain-fall and evaporation of different region in recent 30 years in Hainan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4): 403-407.
- [18] 严正. 海南省水资源配置研究 [J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 32-35.
- YAN Zheng. Research of water source in Hainan Province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(3): 32-35.
- [19] 陈小丽, 吴慧. 海南岛近42年气候变化特征 [J]. 气象, 2004, 30(8): 27-31.
- CHEN Xiao-li, WU Hui. Characteristics of climatic variation of Hainan Island for last 42 years[J]. *Weather*, 2004, 30(8): 27-31.
- [20] 陈飞星, 王华东. 海南岛水资源可持续发展对策[J]. 中国环境科学, 1998, 18(增刊): 74-78.
- CHEN Fei-xing, WANG Hua-dong. Strategies to the sustainable development of water resources in Hainan Island[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(suppl): 74-78.
- [21] 李春鸾, 陈丽英, 郑亚娜. 海南岛暴雨统计分析[J]. 气象研究与应用, 2008, 29(增刊II): 55-58.
- LI Chun-luan, CHEN Li-ying, ZHENG Ya-na-tian. Rainstorm statistical analysis in Hainan Island[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2008, 29(suppl II): 55-58.
- [12] 邓宏海. 海南岛农业自然资源的综合评价和区划[J]. 地理科学, 1989, 9(4): 293-304.
- DENG Hong-hai. Integrated evaluation and regionalization of agricultural natural resources in Hainan Island [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1989, 9(4): 293-304.
- [23] 何大章, 张声遒. 海南岛气候区划[J]. 海南大学学报(自然科学版), 1986, 4(2): 26-35.
- HE Da-zhang, ZHANG Sheng-lin. The regional climate division of Hainan Island[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 1986, 4(2): 26-35.
- [24] 丘宝剑, 卢其尧. 中国农业气候区划试论 [J]. 地理学报, 1980, 35(2): 116-125.
- QIU Bao-jian, LU Qi-yao. A tentative regionalization of agroclimate of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(2): 116-125.
- [25] 丘宝剑, 卢其尧. 我国热带—南亚热带的农业气候区划[J]. 地理学报, 1961, 27: 28-37.
- QIU Bao-jian, LU Qi-yao. Tropical agricultural climate division in tropical-South Asia in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 27: 28-37.
- [26] 卢其尧, 卫林, 杜钟朴, 等. 中国干湿期与干湿区划的研究[J]. 地理学报, 1965, 31(1): 15-23.
- LU Qi-yao, WEI Lin, DU Zhong-pu, et al. A study on the wet and dry periods and regionalization of China according to aridity[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1965, 31(1): 15-23.
- [27] 黄露菁, 陈创买, 李有福. 海南省年降水量的年际变化和特征分析[J]. 中山大学学报论丛, 1994(5): 26-32.
- HUANG Lu-jing, CHEN Chuang-mai, LI You-fu. Analysis of interannual and characteristics of annual rainfall in Hainan Province[J]. *Supplement to the Journal of Sun Yatsen University*, 1994(5): 26-32.
- [28] 海南省农业厅土肥站, 海南土壤[M]. 海口: 三环出版社, 1994: 8-9.
- [29] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 552-558.
- XIAO Han, OUYANG Zhi-yun, ZHAO Jing-zhu, et al. The spatial distribution characteristics and eco-economic value of soil conservation service of ecosystems in Hainan Island by GIS[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 552-558.
- [30] 周璟, 何丙辉, 刘立志, 等. 坡度与种植方式对紫色土侵蚀与养分流失的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 239-243.
- ZHOU Jing, HE Bing-hui, LIU Li-zhi, et al. Effect of slope and planting mode on erosion and nutrient loss in purple soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(2): 239-243.
- [31] 杨红薇, 张建强, 唐家良, 等. 紫色土坡地不同种植模式下水土和养分流失动态特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 615-619.
- YANG Hong-wei, ZHANG Jian-qiang, TANG Jia-liang, et al. Soil, water and nutrient loss under different cropping systems in purple-soil slope-lands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 615-619.
- [32] 李其林, 魏朝富, 王显军, 等. 农业面源污染发生条件与污染机理[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 169-173.
- LI Qi-lin, WEI Chao-fu, WANG Xian-jun, et al. Mechanism and condition of agricultural non-point source pollution [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 169-173.