

自然降雨条件下氮素输入对滇中坡耕地 氮素流失特征的影响

宋娅丽, 王克勤, 王萍, 唐佐芯, 李秋芳, 杜云翔

(西南林业大学 环境科学系, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用野外田间试验和定点监测的方法, 通过研究滇中坡耕地地表径流中氮素流失方式、途径反映其流失特征。结果表明, 产流量与降雨量相关系数达到 0.864 1 ($P < 0.05$), 而土壤侵蚀量与降雨量没有表现出很好的相关关系。在相同降雨条件下, 径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度总体均表现为随着施肥量的增加, 浓度逐渐增加, 即 $CK < N_1 < N_2 < N_3 < N_4 < N_5$; 降雨条件不同, 3 者最高值达到 5.57, 4.36, 1.30 mg/L。硝态氮在自然降雨条件下, 占总氮浓度的 21.62% ~ 83.55%, 铵态氮占 1.02% ~ 38.58%, 硝态氮是氮素流失的主要形式。降雨径流的产生均伴随着土壤侵蚀, 泥沙中总氮流失量也呈不规则波动。各处理全氮富集率在 1.02 ~ 1.58 之间变化。降雨强度最大时, 富集率总体趋势最大, 达到 1.23 ~ 1.53。在相同降雨条件下, 随着施肥量的增加, 全氮富集率差异不明显, 且随着时间的推移逐渐降低。

关键词: 氮素; 流失特征; 自然降雨; 坡耕地; 滇中

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0027-05

中图分类号: S158

Effects of Nitrogen Input on Characteristics of Nitrogen Loss from Sloping Fields Under Natural Rainfall in Central Yunnan Province

SONG Ya-li, WANG Ke-qin, WANG Ping, TANG Zuo-xin, LI Qiu-fang, DU Yun-xiang

(Southwest Forestry University, School of Environmental Sciences, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: Sentinel surveillance method was used to study patterns and means of nitrogen loss in sloping fields in the central Yunnan Province so as to reveal nitrogen loss characteristics. Results showed that the related coefficient between runoff and rainfall was 0.864 1, but soil erosion and rainfall did not show a good correlation. Under the same rainfall conditions, the amounts of TN, $NO_3^- - N$, and $NH_4^+ - N$ were generally increased with the increased amount of nitrogen in the order of $CK < N_1 < N_2 < N_3 < N_4 < N_5$ and under different rainfall conditions, the values of the three chemicals reached 5.57, 4.36, and 1.30 mg/L, respectively. The $NO_3^- - N$ concentration accounted for 21.02% ~ 83.55% in soluble nitrogen and $NH_4^+ - N$ concentration was only about 1.02% ~ 38.58% under natural rainfall conditions, indicating that $NO_3^- - N$ was the main form of nitrogen loss. Rainfall runoff induced soil erosion and the amount of TN in sediment also showed irregular fluctuation. Nitrogen enrichment rate was about 1.02 ~ 1.58 in different treatments. When rainfall intensity was up to maximum, the enrichment rate of the overall trend increased and reached 1.23 ~ 1.53. Nitrogen enrichment rate was not significantly different with the increase of fertilizer under the same rainfall conditions and it decreased with time.

Keywords: nitrogen; loss characteristic; natural rainfall; sloping field; the central Yunnan Province

我国水土流失严重区域主要分布在黄土高原和云贵高原以及东部的一些丘陵山地^[1], 云南省属于水土流失二级敏感性区域^[2]。该省降雨主要集中在 5—10 月份, 雨季雨量充沛, 暴雨易导致水土资源流

收稿日期: 2010-04-08

修回日期: 2010-06-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“微区域集水系统控制云南山区农业面源污染的机理研究”(30660037); 云南省自然科学基金项目(2006D0041M); 云南省科技计划项目(2006SG20); 西南林业大学水土保持重点学科

作者简介: 宋娅丽(1985—), 女(汉族), 山西省长治市人, 硕士研究生, 主要从事环境生态与面源污染研究。E-mail: songyali19851205@sina.com。

通信作者: 王克勤(1964—), 男(汉族), 甘肃省庄浪县人, 博士, 教授, 主要从事小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail: wangkeqin7389@sina.com。

失。农田氮、磷的损失程度取决于当地的降雨情况(降雨强度、降雨时间和降雨分布)、施肥状况(种类、时间、数量)、地形地貌特点、植被覆盖条件、土壤条件和人为管理措施等多种因素^[3]。过量施用化肥,施肥结构不合理,营养物质随降水径流和渗漏进入水体,加剧了水体富营养化的发生,对山区农业的可持续发展构成了严重的威胁。滇中坡耕地的烤烟种植是该区最主要的农田利用方式,也是污染物流失的主要策源地。污染物随降雨径流流失、泥沙流失成为造成水体污染、土壤退化的主要形式。地表径流是产沙的主要原因,土壤侵蚀所产生的泥沙也是一种严重的面源污染^[4]。诸多学者主要集中于从小流域尺度研究污染物输出特征^[5-6],采用人工降雨方式研究污染物流失规律^[7-8],而从自然降雨条件下定量研究肥料利用与养分流失之间的规律较少。为此,有待深入开展自然降雨条件下氮素流失差异的研究。本研究在自然降雨条件下,利用野外观测方法开展定量研究,探寻滇中坡耕地氮肥对氮素流失的影响,以期为合理利用坡耕地资源,有效控制农田氮素损失和防止水体富营养化提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于抚仙湖流域尖山河小流域,地处云南省澄江县西南部,位于北纬 $24^{\circ}32'00''$ — $24^{\circ}37'38''$,东经 $102^{\circ}47'21''$ — $102^{\circ}52'02''$ 之间;最高海拔在流域北部,为2347.4 m,最低海拔在尖山河入抚仙湖的入口处,为1722 m,相对高差625.4 m,属澄江三级阶地。流域内山高坡陡,河床落差大,岩石风化严重,坡积层厚,且人为开垦的 $>25^{\circ}$ 的坡耕地较多,水土极易流失。

尖山河小流域多年平均降雨量1050 mm,雨季为5—10月,汛期降雨量占全年总降雨量的75%。小流域土地总面积35.42 km²,其中梯坪地面积177 hm²,坡耕地面积248 hm²,次生林1346 hm²,人工林567 hm²,退耕还林地、灌木林及草地(总称灌木林草地)共1063 hm²,其它土地类型142 hm²(其中河道等水面积为5.8 hm²,村庄道路等非生产用地40.7 hm²,难利用地94.5 hm²),坡耕地面积占总耕地面积的58.35%,为农民种植烤烟的主要土地类型。

2 研究方法

2.1 坡面微型小区的布设

经过踏查,试验区设在流域内坡度为 15° 的坡耕地,布设了6组不同施肥量的微型试验小区,面积均为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,各组做3个重复。烤烟品种为K326,

由玉溪市烟草公司统一调入。化肥试验以当地农民习惯为参考,微型小区各施肥浓度见表1,氮磷钾比例为 $1:0.5\sim 1:3$ 。基肥与追肥均施用复混肥,氮磷钾的比例为 $12:6:24$,施肥时间分别为2009年5月4日与6月3日;提苗肥在5月16日施用氮磷钾比例为 $28:0:5$ 的肥料,8月底完成采收。作物种植密度为16500株/hm²。

表1 各微型小区氮肥处理 kg/hm²

处理编号	基肥	提苗肥	追肥	施用纯氮	施用纯磷
CK	0	0	0	0	0
N ₁	247.50	45.00	0.00	35.10	17.55
N ₂	247.50	45.00	386.25	81.45	40.73
N ₃	247.50	45.00	772.50	127.80	63.90
N ₄	247.50	45.00	1158.75	174.15	87.08
N ₅	247.50	45.00	1545.00	220.50	110.25

2.2 样品采集

试验区2009年6—8月共产生8场具有较大产流的自然降雨事件,将微型小区塑料桶内泥沙与水样混匀,取1000 ml径流样品,将样品4℃保存并在24 h内过滤后测定其中的全氮、硝态氮、铵氮含量。通过收集塑料桶内降雨来收集径流量和泥沙样。泥沙沉积后取样,在避光条件下自然风干,用于泥沙测定。在烤烟移栽前期使用“对角线法”采集各微型小区表层(0—20 cm)土壤用于调查土壤养分背景值。土壤基本理化性质:土壤含水率2.93%,pH值为4.93,有机质含量1.08%,全氮含量370 mg/kg,碱解氮含量68.17 mg/kg。

2.3 样品的测定与分析

降雨量采用翻斗式自计雨量计进行观测,径流量利用体积法测定,泥沙含量利用置换法测定。水样测定前,先混合均匀后用滤纸过滤到澄清。总氮测定采用过硫酸钾(K₂S₂O₈)氧化—紫外分光光度法,铵态氮用纳氏试剂比色法,硝态氮用酚二磺酸分光光度法,颗粒态氮使用差减法(即用测定出总氮与溶解态氮相减)。土壤、泥沙全氮测定用凯氏蒸馏法,碱解氮用碱解扩散法。同时测定土壤含水量。以上测定各个指标均做3组平行试验,取平均值。

数据与图表均采用统计分析软件SPSS 13.0软件以及Excel处理数据。

3 结果与分析

3.1 烤烟生长期降雨变化特征

通过自计雨量计观测可知,2009年抚仙湖尖山

河小流域全年降雨量为 627.4 mm, 低于多年平均降雨量 1 050 mm 的 40%。在烤烟生育期间(5 月 3 日至 8 月 30 日), 总降雨量为 452 mm, 为全年降雨量的 72.04%。2009 年最大的一次降雨和产流发生在 7 月 1 日, 降雨量为 46.6 mm。1, 2, 11, 12 月降雨量为 10.4 mm, 仅占全年降雨量的 1.66%。本试验在 6—8 月选取的 8 场降雨均发生明显产流。试验区内各微型小区的坡度、坡向、土壤条件基本一致, 在同等条件下, 降雨特征是径流和泥沙产量大小的决定因素^[9]。按照我国气象部门规定的降雨强度标准来计算, 8 场自然降雨中, 6 月 6 日和 6 月 24 日的分别属于小雨、中雨。7 月的 3 场降雨属于暴雨, 8 月的 3 场降雨属于暴雨。从图 1 可以看出, 产流量与降雨量整体趋势一致, 两者相关系数达到 0.864 1 ($P < 0.05$), 而土壤侵蚀量与降雨量没有表现出很好的相关关系, 且趋于恒定波动不大, 降雨强度与土壤侵蚀量趋势一致。在降雨量的影响下, 产流量、土壤侵蚀量之间差异极显著 ($P < 0.01$)。

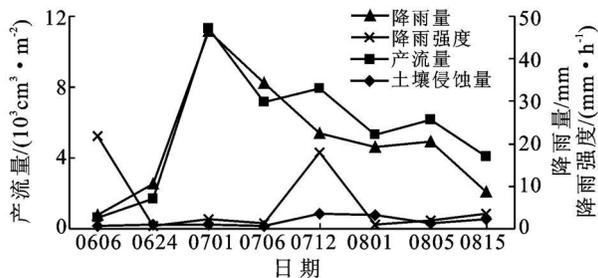


图 1 不同降雨条件下各小区产流量和侵蚀量

3.2 氮素随径流流失浓度及形态特征

3.2.1 氮素随径流流失浓度特征

从图 2 可以看出, 在不同降雨条件下, 8 场降雨的降雨量达到最大值时, 各处理随径流流失的总氮、铵态氮浓度达到最大值, 分别为 2.20~5.57 mg/L, 0.11~1.30 mg/L, 且随着降雨量的不同差别较大; 而硝态氮浓度则在 6 月 24 日达到最大值, 随后的几场降雨都逐渐减小。N₅ 处理在 8 场降雨中总氮和硝态氮浓度最高值达到 5.52 和 4.36 mg/L, 高出其它各处理的 2.85~4.69 倍和 4.73~10.45 倍, 说明同一处理在不同的降雨条件下, 氮素浓度变化也较大。在相同降雨条件下, 总氮、硝态氮、铵态氮浓度总体均表现为: CK < N₁ < N₂ < N₃ < N₄ < N₅, 差异性极显著 ($P < 0.01$), 即随着施肥量的增大, 径流中氮素浓度增大。在 8 场降雨过程中, 8 月 15 日的总氮浓度最小为 0.43~1.82 mg/L, 7 月 1 日的总氮含量最大 2.02~5.57 mg/L, 且有一定的波动。随着时间的推移, 地表径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度总体上呈波浪式下降趋势。

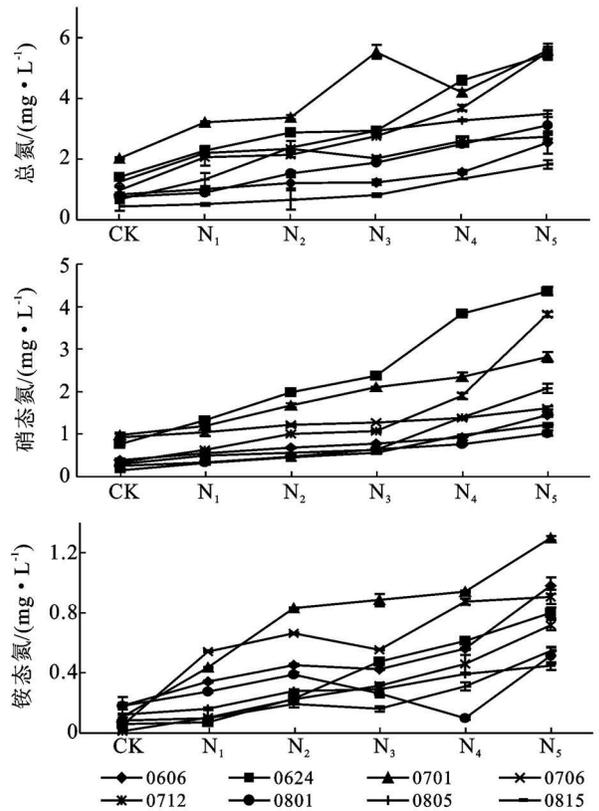


图 2 不同处理径流中氮素浓度变化

注: 误差线代表平均值的标准误差。

3.2.2 氮素随径流流失形态特征

降雨径流中各形态氮素流失浓度比见图 3。8 场降雨中, 可溶态氮是自然降雨条件下径流流失的主要形态, 硝态氮是可溶态的主要部分, 占总氮浓度的 21.62%~83.55%。铵态氮占 1.02%~38.58%, 在追肥后第一天达到最大值, 此后随着时间的推移, 比例在总体上呈下降趋势。铵态氮/总氮可以反映促进氮素转化与流失潜能的相对水平^[10], 说明铵态氮在追肥后第一天经历一个最大值后, 随着时间的推移, 相对流失潜能逐渐减小, 而逐渐被硝态氮、总氮取代。而硝态氮/总氮在施肥后大约 18 d 左右, 达到最大值。在相同降雨条件下, 硝态氮、铵态氮在总氮中存在的比值的均值顺序分别为: N₂ < CK < N₃ < N₃ < N₄ < N₅, CK < N₁ < N₃ < N₄ < N₂ < N₅; 两者的和占总氮的比值最大值为 98.07%, 接近于 1.00, 说明施氮能够显著提高硝态氮、铵态氮在总氮中存在的比重, 硝态氮和铵态氮是水体中氮素污染的主要污染物。

3.3 氮素随泥沙流失量及富集率特征

3.3.1 氮素随泥沙流失量特征

在 8 场降雨过程中, 每次降雨径流的产生均伴随着土壤侵蚀, 径流中泥沙的浓度没有呈现出规律性变化, 泥沙中总氮流失量也呈不规则波动。当 7 月 12 日的降雨强度达到最大 17.90 mm/h (平均值) 时, 各处理总氮泥沙流失量

均达到最大值,且随着施肥量的增加,总氮流失量增加, N_5 处理达到 $407.32 \text{ mg}/\text{km}^2$,高出其它各处理的 $0.03 \sim 47.53$ 倍。在8场降雨中,7月12日各处理的平均氮流失量为其它次降雨的 $1.06 \sim 8.23$ 倍(图4)。在相同降雨条件下,随着施肥量的增加泥沙流失量逐渐增加。经过方差分析,降雨强度对土壤侵蚀量的影响差异极显著($P < 0.01$)。

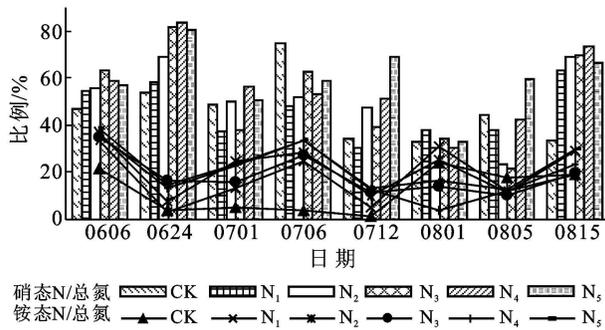


图3 径流中不同形态氮素浓度占总氮浓度的比例

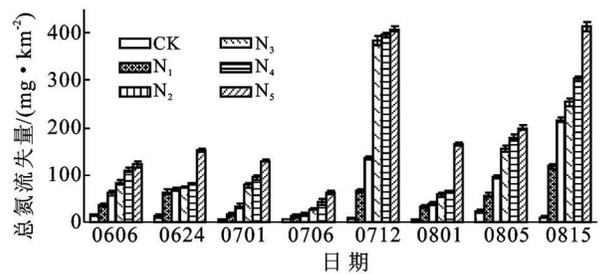


图4 不同降雨条件下泥沙中总氮流失量

3.3.2 泥沙中氮素富集特征 富集率是侵蚀泥沙养分含量与土壤养分含量的比值^[11],是衡量土壤养分相对大小的重要指标。从表2可以看出,各处理全氮富集率在 $1.02 \sim 1.58$ 之间变化。降雨强度最大时,富集率总体趋势最大,达到 $1.23 \sim 1.53$ 。在相同降雨条件下,随着施肥量的增加,全氮富集率整体上呈略微减小趋势,但差异不明显($P < 0.01$)。随着时间的推移,全氮富集率呈减小趋势,但均不低于 1.00 。

表2 各处理侵蚀泥沙养分富集率

项目		090624	090701	090706	090712	090801	090805	090815
CK	富集率	1.33	1.46	1.26	1.23	1.08	1.03	1.02
	N_e/N_s	0.52/0.39	0.57/0.39	0.49/0.39	0.48/0.39	0.42/0.39	0.40/0.39	0.40/0.39
N_1	富集率	1.58	1.53	1.37	1.53	1.34	1.11	1.14
	N_e/N_s	0.60/0.38	0.58/0.38	0.52/0.38	0.58/0.38	0.51/0.38	0.42/0.38	0.43/0.38
N_2	富集率	1.49	1.49	1.37	1.50	1.31	1.14	1.22
	N_e/N_s	0.54/0.36	0.54/0.36	0.49/0.36	0.54/0.36	0.47/0.36	0.41/0.36	0.44/0.36
N_3	富集率	1.43	1.46	1.30	1.43	1.22	1.08	1.16
	N_e/N_s	0.53/0.37	0.54/0.37	0.48/0.37	0.53/0.37	0.45/0.37	0.40/0.37	0.43/0.37
N_4	富集率	1.39	1.39	1.18	1.39	1.20	1.05	1.05
	N_e/N_s	0.53/0.38	0.53/0.38	0.45/0.38	0.53/0.38	0.46/0.38	0.40/0.38	0.40/0.38
N_5	富集率	1.37	1.38	1.29	1.30	1.10	1.03	1.04
	N_e/N_s	0.47/0.34	0.47/0.34	0.44/0.34	0.44/0.34	0.37/0.34	0.35/0.34	0.35/0.34

注: N_e 为侵蚀泥沙全氮含量; N_s 为原表土土壤全氮含量。

4 讨论

影响径流中总氮浓度的因素主要有降雨条件、植被覆盖度、坡度、坡向、坡位、土壤类型、施肥量等,在其它条件基本相同情况下,造成径流中氮素流失量具有显著性差异的取决于不同施肥量。在植物—土壤系统中,植物的氮肥利用率很低,大部分被土壤吸附。而化肥施用是导致降雨径流和泥沙排出农田生态系统的主要因素。不同降雨条件下,径流量取决于降雨量,邓阳春等^[12-13]的研究结果也表明,降雨量为影响地表径流的主要因素。

而雨强对坡地侵蚀研究各不相同,傅斌等人^[14]在研究变雨强连续降雨坡地侵蚀特征中提出,雨强是影响地表产流的重要因素,随雨强的增大,地表径流量增

加。程冬兵等人^[15]在研究不同下垫面水土流失特征中提出,降雨量主要影响产流,降雨强度则主要影响产沙。本研究则认为降雨强度与径流量的关系不显著,而与土壤侵蚀量相关性显著。在降雨条件不同的条件下,随着降雨量的增大,雨水和径流对坡地的冲刷作用明显增强,氮素流失量也相应显著增加,说明大量氮素随着降雨径流而流失,这与吕唤春等人的研究一致^[6]。

地下水中铵态氮、亚硝态氮含量很低,朱波等人^[17]的研究中亚硝态氮仅占 $0.01\% \sim 1.0\%$,故本试验着重研究硝态氮、铵态氮占总氮的比例。试验表明,硝态氮在氮素组成中所占比例最高,铵态氮较少,硝态氮是地表水氮素存在的主要形式;另外,诸多学者研究表明地表径流氮素迁移的主要载体为细颗粒物,颗粒物与之结合成为地表水氮素存在的主要形式

之一。氮肥施入土壤后,在微生物作用下,通过硝化作用形成硝态氮。土壤胶体带负电荷,吸收较少的硝态氮,而硝态氮易随径流进入水体,对水体造成严重的污染。而铵态氮占总氮的比例在烤烟整个生育期间,含量总体成减小趋势。这是因为在烤烟生长、吸收、铵挥发的作用下,施氮后径流中铵氮流失潜能递减。石德坤^[18]的研究也表明,地表径流对硝态氮的流失起着决定性作用。同时,土壤颗粒和胶体对铵态氮具有很强的吸附作用,使得大部分铵态氮在于土壤中。但当土壤的吸附量达到一定量时,铵态氮仍会随着径流进入水体,对水体造成污染。

径流氮素流失过程中,首先选择搬运细颗粒,而细颗粒会随着径流时间的延长逐渐减少。到次降雨后期,氮素流失主要因雨滴剥离分散土壤大团聚体,在土壤大团聚体被剥离的瞬间会有相对较多的泥沙随径流流失^[19],因此坡耕地不同施肥处理的产沙量波动程度很大,没有表现出一定的规律性。

在本试验中,在相同降雨条件下,泥沙全氮富集率随着施肥量的增加逐渐减小。这是由于影响泥沙中养分富集现象的因素主要有植被覆盖和施肥,它是由表层土壤的侵蚀引起的。试验中各处理植被覆盖度相同,泥沙全氮富集率主要由施肥量决定。表层土壤养分含量往往高于下部土层,施肥量的增加使得土壤表层养分含量增加。施肥后,随着降雨量的增加,有部分氮素随径流淋洗至进入土壤。坡耕地种植烤烟,人为活动影响较大,土壤颗粒的选择性作用小,因此泥沙的养分含量变化差异不大。随着时间的推移,土壤表层全氮含量逐渐降低,泥沙全氮含量也逐渐降低,富集率整体趋势逐渐降低。

5 结论

(1) 烤烟生育期(5月3日至8月30日)降雨量为452 mm,占全年降雨量的72.04%,是面源污染物输出的关键时期。产流量与降雨量相关系数达到0.864 1($P < 0.05$),而土壤侵蚀量与降雨量没有表现出很好的相关关系。

(2) 在相同降雨条件下,径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度总体均表现为:CK < N₁ < N₂ < N₃ < N₄ < N₅;降雨条件不同,3者最高值达到5.57, 4.36和1.30 mg/L。硝态氮在自然降雨条件下,占总氮浓度的21.62%~83.55%,铵态氮占1.02%~38.58%,硝态氮是氮素流失的主要形式。

(3) 每次降雨径流的产生均伴随着土壤侵蚀,泥沙中总氮流失量也呈不规则波动。随着施肥量的增加,总氮流失量增加。各处理全氮富集率在1.02~

1.58之间变化。降雨强度最大时,富集率总体趋势最大,达到1.23~1.53。在相同降雨条件下,随着施肥量的增加,全氮富集率差异不明显,且随着时间的推移逐渐降低。

[参考文献]

- [1] 欧阳志云,王效科,苗鸿,等.中国生态环境敏感性及其趋于差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):9-12.
- [2] 王效科,欧阳志云,肖寒,等.中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J].生态学报,2001,21(1):14-19.
- [3] 司友斌,王慎强,陈怀满,等.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000,32(4):188-193.
- [4] 杨新民,沈冰,王文焰,等.降雨径流污染及其控制述评[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(3):58-62.
- [5] 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.
- [6] 陈志良,程炯,刘平,等.暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):30-32.
- [7] 王涛,张维理,张怀志,等.滇池流域人工模拟降雨条件下农田施用有机肥对磷素流失的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1092-1097.
- [8] 耿晓东,郑粉莉,张会茹,等.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(40):39-43.
- [9] 王克勤,宋泽芬,李太兴,等.抚仙湖一级支流尖山河小流域的面源污染物贡献特征[J].环境科学学报,2009,29(6):1321-1328.
- [10] 张志剑,董亮,朱荫涓,等.水稻田面水氮素的动态特征、模式表征及排水流失研究[J].环境科学学报,2001,21(4):475-580.
- [11] 王兴祥,张桃林,张斌,等.红壤旱坡地农田生态养分循环和平衡[J].生态学报,1999,19(3):335-341.
- [12] 邓阳春,梁永红,袁玲,等.烟地土壤养分淋失与利用研究[J].水土保持学报,2009,23(2):21-24.
- [13] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作措施红壤坡耕地水土流失特征的研究[J].水土保持学报,2001,15(4):66-69.
- [14] 傅斌,王玉宽,王道杰,等.变雨强连续降雨坡地侵蚀特征[J].水土保持学报,2009,23(2):25-27.
- [15] 程冬兵,左长清,蔡崇法,等.不同下垫面每次降雨水土流失特征及影响因素分析[J].草业学报,2007,16(5):84-89.
- [16] 吕唤春,陈英旭,方志发,等.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):91-92.
- [17] 朱波,汪涛,徐泰平,等.紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J].山地学报,2006,24(5):601-606.
- [18] 石德坤.模拟降雨条件下坡地氮流失特征研究[J].水土保持通报,2009,29(5):98-101.
- [19] 于国强,李占斌,张霞,等.野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):10-14.