陈　志,王伟峰,孙　丽. 不同降雨条件下红壤坡地养分垂向流失规律[J]. 江苏农业科学,2017,45(8):241 - 244.
doi:10.15889/j.issn.1002 - 1302.2017.08.065

不同降雨条件下红壤坡地养分垂向流失规律

陈　志[1,2], 王伟峰[3], 孙　丽[2]

(1. 昆明理工大学环境科学与工程学院,云南昆明 650500; 2. 云南省地矿局第一水文地质工程地质大队,云南昆明 650041;
3. 内蒙古林业科学研究院生态功能与森林碳汇研究所,内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:为明确红壤坡地不同雨强下养分流失的途径和规律,研究百喜草(*Paspalum natatu*)全园覆盖、全园敷盖、全园裸露 3 种坡地利用类型下地表径流、壤中流、泥沙中总氮(TN)、总磷(TP)迁移特性及流失总量。结果表明:(1)不同雨型下采取生态措施(百喜草全园覆盖、全园敷盖)对 TN、TP 浓度起到明显的控制作用,其中百喜草全园覆盖(活地被植物)效果更佳;(2)不同雨型下不同处理径流中氮、磷的流失主要集中在径流初期,后期均匀稳定;(3)雨型越小,径流携带养分流失量占养分总流失量的比例越大,不同雨型中,清水径流携带的养分流失几乎可忽略不计,泥沙携带的养分才是真正的养分流失根源;(4)以 TP 为例,壤中流的浓度随深度的增加而减小,且浓度随壤中流流速的增大而减小,但壤中流单位时间内的流失量整体趋于平缓,壤中流及地下径流携带的养分可忽略不计。研究结果对科学制定红壤坡地养分管理措施、防治农业面源污染具有重要意义。

关键词:红壤坡地;地表径流;壤中流;养分流失;百喜草

中图分类号: S156.6;S157　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 - 1302(2017)08 - 0241 - 04

农业流域非点源污染物的大量输出是导致水体富营养化的主要原因[1],非点源污染(NPS)在源区的产生机制及其在流域的传输过程日益受到关注[2]。红壤是我国亚热带地区的地带性土壤,广泛分布于 15 个省(区),缓坡地(6° ~ 15°)是红壤区的主要组成部分,约占红壤区的 28%。该地区水热资源丰富,但时空分配不均,有效水含量低(约 10%),造成了该地区洪涝灾害和季节性干旱严重[3-7]。降雨—径流过程造成的非点源污染的常见方式主要有人工模拟降雨和自然降雨,前者条件易控制,便于研究不同管理方式和地形条件下的氮磷流失。王涛等利用模拟降雨法研究了滇池流域磷的输出特征和机理[8-9];石德坤采用人工降雨的方法研究了坡地氮素的流失规律[10];Walter 等采用人工模拟降雨方法证实了地表施用的有机肥中营养元素的流失是导致面源污染的重要原因之一[11-12]。在自然降雨条件下进行研究,不仅可对比研究土壤侵蚀和养分流失特征,还可用于分析农业活动和天气条件影响下侵蚀和流失的季节性变化[13]。相较而言,自然降雨具有独特的优势,更接近真实情况。对于红壤区,由于水热资源丰富,植被生态系统演替快,地表植被恢复重建对水土流失的影响与黄土区域、紫色土和喀斯特岩溶区存在极大差异[14],而研究红壤坡地方面,尤其在自然降雨下养分的立体淋溶流失等方面的报道较少,这对降雨引起的侵蚀危害难以作出科学评价。本研究通过大型土壤水分渗漏装置(lysimeter),研究了不同生态措施下红壤坡地自然降雨的养分流失状况。植物选择百喜草(*Paspalum natatu*),为一种暖季型的多年生禾草,可作为公路、堤坝等绿化草种或牧草。采用的水土保持措施为百喜草全园覆盖、全园敷盖、全园裸露(对照)3 种处理,通过取样分析,分析不同水土保持措施和雨型条件下的土壤地表径流以及不同层次的壤中流养分流失特征,揭示了红壤坡地养分垂向流失规律,对防治农业面源污染具有重

收稿日期:2016 - 02 - 17
基金项目:内蒙古自然科学基金博士基金(编号:2015BS0323)。
作者简介:陈　志(1980—),男,湖北阳新人,博士研究生,研究方向为水土保持治理和景观生态恢复。E - mail:443196863@qq.com。
通信作者:王伟峰,男,博士,研究方向为植被生态恢复工程。E - mail:wang.wf1985@163.com。

[11]王晓娟,贾志宽,梁连友. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(2):419 - 425.
[12]宇万太,姜子绍,马　强,等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1057 - 1064.
[13]路　浩,王海泽. 盐碱土治理利用研究进展[J]. 现代化农业,2004,301(8):10 - 12.
[14]Lu H,Wang H Z. Advances in the use of saline - alkali soil treatment[J]. Modernizing Agriculture,2008,301(8):10 - 12.
[15]猴倩倩,韩致文,王国华. 中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(29):246 - 250.
[16]杨建国,樊丽琴,许　兴,等. 盐碱地改良技术集成示范区水土环境变化研究初报[J]. 中国农学通报,2011,27(1):279 - 285.
[17]王少丽,周和平,瞿兴业,等. 干旱区膜下滴灌定向排盐和盐分上移地表排模式研究[J]. 水利学报,2013,5(5):549 - 555.
[18]王　静,许　兴,肖国举,等. 脱硫石膏改良宁夏典型龟裂碱土效果及其安全性评价[J]. 农业工程学报,2016,32(2):141 - 147.
[19]王立志,陈明昌,张　强,等. 脱硫石膏及改良盐碱地效果研究[J]. 中国农学通报,2011,27(20):241 - 245.
[20]阿依古丽·达嘎尔别克,艾比布拉·伊马木,大森圭佑,等. 不同洗盐法对盐碱化土壤改良效果研究[J]. 新疆农业科学,2015,52(3):477 - 482.
[21]崔　媛,张　强,王　斌,等. 脱硫石膏对重度苏打盐化土中主要离子淋洗的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):310 - 314.

要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于江西省九江市德安县东郊的江西省水土保持生态科技园内(115°42′～115°43′E,29°16′～29°17′N),为我国红壤分布的中心区域,属亚热带季风区,雨热基本同期,年均降水量 1 350.9 mm,年平均气温 16.7 ℃,年日照时间 1 650～2 100 h,年平均无霜期 249 d。地形条件在红壤丘陵区具有代表性,地貌类型为浅丘岗地,土壤成土母质主要是第四纪红黏土红壤。由于长期不合理的采伐利用,原生植被遭到破坏,现存植被主要是处于不同逆行演替阶段的次生群落,如荒草、灌木和沙地植被,以及人工营造或自然恢复的湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等次生林。

1.2　样地设置

研究区的径流小区样地设置在小山岗的山腰上,始建于 2000 年。选择地形、土壤等立地条件基本一致的坡地(坡度为 14°),面积 225 m^2(15 m×15 m),设置 3 个处理小区,小区面积均为 75 m^2(5 m×15 m)。供试地被物选择百喜草,试验设置 3 个处理,分别为(1)全园覆盖(种植百喜草,覆盖度 100%);(2)全园敷盖(将百喜草刈割后敷盖于地表,敷盖度 100%,厚度 5 cm);(3)对照(地表裸露)。采样包含 3 次典型降雨,其中地表径流当天观测记录,由于壤中流存在滞后性,降雨 2～3 d 后多次观测记录。

不同处理小区的挡土墙从上至下均设置 4 个出水口,最上部为地表径流出水口,用塑胶管连接到径流池。各径流池安置在和小区相连的观测房内,径流池根据当地可能发生的最大暴雨和径流量设计成Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号 3 个池,每池均按长 110 cm、宽 110 cm、高 112 cm 方柱形构筑,Ⅰ、Ⅱ号 2 池在墙壁两侧装有五分法 60°“V”形三角分流堰,池壁均安装有搪瓷水尺,能直接读出地表径流量,3 个小区共有 9 个地表径流池。另外 3 个出水口分别在地表以下 30、60、105 cm 处,用塑胶管连接到静水池,并用自记水位计及 20°“V”形三角堰量计渗流量。每个小区 30、60、105 cm 处各连接 1 个静水池,共 9 个静水池(又称壤中流观测池)。地下径流为地表以下 30、60 cm 处的壤中流和 105 cm 处的径流量之和。工程完工至今,已沉降 10 年以上。

1.3　试验方法

研究典型降雨下地表径流的变化特征,分析不同雨型下地表径流和泥沙中养分浓度的变化规律、不同处理壤中流及地下径流养分浓度的空间变化规律,最后得出养分流失的主要途径及地被物在控制养分流失中发挥的功效。降雨产流过程中,每 6 min 取 1 个样,从总氮(TN)、总磷(TP)2 个指标上分不同的雨型进行分析,观测浑水径流的养分流失特征。TN、TP 采用 $HClO_4-H_2SO_4$ 消化法,消化或提取后的溶液使用全自动化学分析仪 Smart－Chem 进行分析。

2　结果与分析

2.1　典型降雨地表径流养分变化特征

2.1.1　中雨型 TN、TP 养分变化　从图 1 可以看出,对于连续性短历时中雨型而言(本次降雨历时 80 min,雨量 16.2 mm),不管是 TN 浓度,还是 TP 浓度,裸露对照区较其他 2 区差异明显,裸露对照区浑水径流 TN、TP 浓度为全园覆盖区、全园敷盖区的 10～20 倍,原因是裸露对照区地表径流夹杂大量泥沙,泥沙对养分具有较强的富集能力,加之大量不溶性 N、P 随泥沙携带,而全园覆盖区、全园敷盖区因地被物的消能和拦截作用,地表径流基本为清水径流。从不同处理的养分变化特征可知,裸露对照区 TP 浓度呈下降趋势,而 TN 浓度则呈先增加后减小的趋势。全园覆盖区 TP 浓度呈先下降后稳定的趋势,全园敷盖区则先上升后下降且逐渐趋向稳定,产流初期全园覆盖区浓度较全园敷盖区略高,而后略低;TN 全园覆盖区和全园敷盖区均呈先增加后减少的趋势,全园敷盖区一直高于全园覆盖区,主要是全园敷盖区枯落物腐殖质溶解于径流所致。

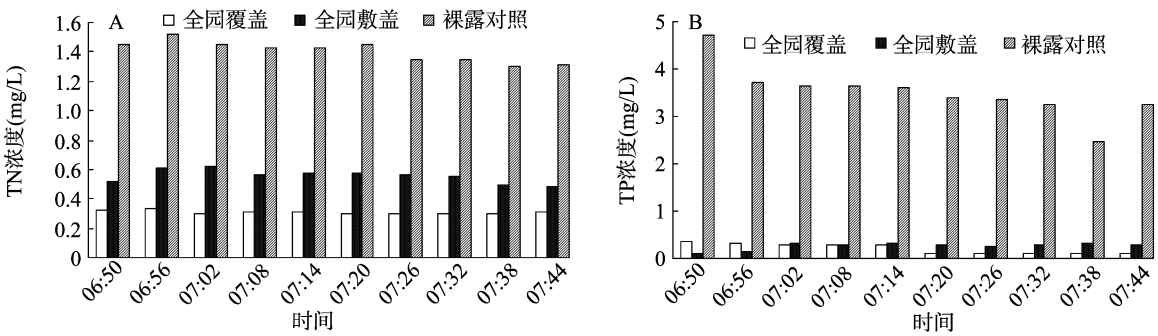

图1　中雨型下不同处理浑水径流 TN(A)、TP(B) 养分浓度随降雨时间的变化

2.1.2　大雨型 TN、TP 养分变化　从图 2 可以看出,对于短历时大雨型而言(本次降雨历时 40 min,雨量 28.3 mm),TN、TP 浑水径流养分浓度依然是裸露对照区较其他 2 区高,但差距有所减小,原因是大雨型下浑水径流中粗沙颗粒较多,土壤养分富集能力减弱,加之地表径流流速加大,对养分有稀释作用所致。TN 浓度 3 个小区均呈先减小后增加再减小的趋势,可能是因为此次降雨强度先减弱后增强所致,全园敷盖区因腐烂的地被物被强降雨打击,加之地表土壤原始积累的 TN 较高,其浓度始终较全园覆盖区高;TP 浓度全园覆盖区养分浓度呈波动变化,降雨初期浓度最高,无明显变化规律,TP 浓度全园敷盖区一直高于全园覆盖区。

2.1.3　小雨型 TN、TP 养分变化　对于连续性短历时小雨型而言(本次降雨历时 55 min,雨量 9.0 mm),由于全园覆盖区和全园敷盖区产流很小,难以分时段分析养分流失过程的变化规律,对于小雨型下的养分流失过程,仅对裸露对照区养分变化规律进行了分析,结果为裸露对照区浑水径流养分浓度

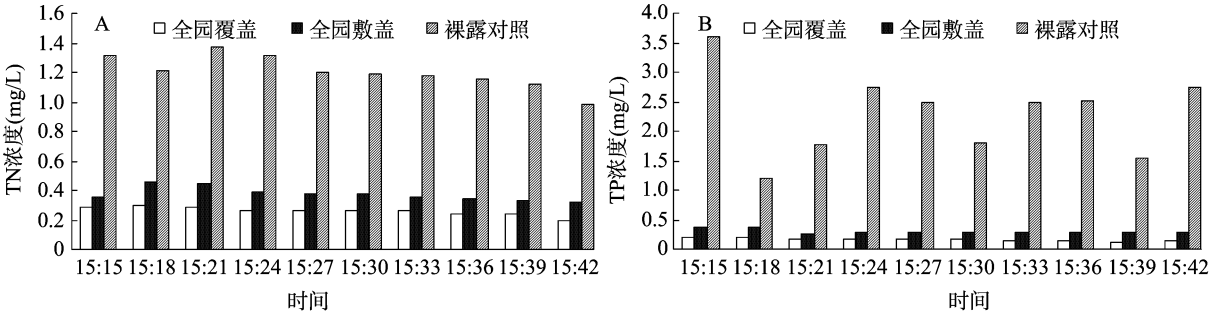

图2　大雨型下不同处理浑水径流 TN(A)、TP(B) 养分浓度随降雨时间的变化

随时间的推移 TN、TP 浓度均呈下降趋势。

2.2　典型降雨泥沙养分富集特征

不同雨型下泥沙养分的富集比见表 1。由于全园覆盖区、全园敷盖区几乎没有产生泥沙,径流为清水径流,即便全园敷盖区有部分杂质,也是腐烂地被物的残渣,本试验仅以全园裸露区的泥沙携带养分为研究对象,TN 的养分富集化程度较 TP 要高,TN 富集比明显高于 TP 的富集比,这与第四纪红壤黏土富氮缺磷的性质有关。雨型和降雨强度越大,TN、TP 富集化程度越小,原因是养分富集作用同泥沙的粒径有关,小粒径具有疏松多孔性,比表面积较大,吸附能力增强,小雨型降雨侵蚀力较弱,地表径流速度较缓,土壤结构不易破坏,较大的土壤颗粒难以剥离运移,泥沙粒径较小,富集化程度增强。

表 1　不同雨型下全园裸露区泥沙养分富集比

雨型	TN			TP		
	雨前表层土壤(g/kg)	泥沙携带(g/kg)	富集比	雨前表层土壤(g/kg)	泥沙携带(g/kg)	富集比
大雨	0.85	1.10	1.30	0.19	0.23	1.20
中雨	0.85	1.12	1.32	0.19	0.24	1.25
小雨	0.85	1.15	1.35	0.19	0.25	1.29

2.3　典型降雨泥沙养分总流失模数

将不同雨型下泥沙流失量以及泥沙养分浓度相乘,即可得到泥沙携带养分流失量,同样将径流养分流失量乘以该次降雨的径流量,即可得知该场次降雨下径流养分流失量,二者之和为该场降雨总养分流失量。现将各典型降雨下养分流失总量、径流携带量和泥沙携带量的数量关系进行分析(表 2)。

表 2　不同雨型下不同处理养分流失量

雨型	处理	TN(g)				TP(g)			
		泥沙携带(ES)	径流携带(ER)	ES/ER	总流失量	泥沙携带(ES)	径流携带(ER)	ES/ER	总流失量
大雨	全园覆盖	0	0.022 3	0	0.022 3	0	0.004 8	0	0
	全园敷盖	0	0.027 2	0	0.027 2	0	0.015 0	0	0
	裸露对照	154.881 5	0.548 9	282	155.430 5	32.384 3	1.008 3	32	33.392 7
中雨	全园覆盖	0	0.005 0	0	0.005 0	0	0.002 0	0	0.002 0
	全园敷盖	0	0.007 0	0	0.007 0	0	0.003 6	0	0.003 6
	裸露对照	21.712 0	0.103 1	210	21.815 1	4.652 6	0.117 3	40	4.769 9
小雨	全园覆盖	0	0.000 9	0	0.000 9	0	0.000 4	0	0.000 4
	全园敷盖	0	0.001 8	0	0.001 8	0	0.001 0	0	0.001 0
	裸露对照	3.545 0	0.028 3	125	3.573 3	0.770 7	0.016 5	47	0.787 2

大雨型下,全园覆盖、全园敷盖处理由于无泥沙,*ES/ER* 在此不计。对于裸露对照区而言,TN 的 *ES/ER* 为 282,TP 的 *ES/ER* 为 32,说明在浑水径流中,有泥沙产生的裸露对照区,泥沙带走的养分比径流带走的养分大,因此,大雨型下不同处理养分流失量均以泥沙携带为主,其中 TN 的流失量较 TP 的流失量更为严重。TN 裸露对照区总流失量是全园覆盖区的 6 970 倍,是全园敷盖区的 5 714 倍;TP 裸露对照区流失总量是全园覆盖区的 6 957 倍,是全园敷盖区的 2 226 倍,表明全园覆盖区、全园敷盖区在保持土壤养分,阻止土壤侵蚀方面具有明显作用,其中全园覆盖区效果更好,原因是活的植物因生长需要而吸收养分,而死地被植物因腐烂而制造新的养分,随径流而流失。

中雨型下,全园覆盖、全园敷盖处理依然无泥沙,*ES/ER* 在此不计。对于裸露对照区而言,TN 的 *ES/ER* 为 210,较大雨型下有所减小,说明中雨型下,TN 径流携带的养分流失占总养分流失的比重在增加;而 TP 的 *ES/ER* 为 40,较大雨型下有所增加,说明径流携带的 TP 占总养分流失的比重在减小。同大雨型降雨一样,全园覆盖、全园敷盖区因无泥沙产生,在此不计其泥沙携带养分流失量,裸露对照区中雨型养分流失量仍以泥沙携带为主,且 TN 流失量较 TP 流失量更为严重。3 个小区较大雨型下 TN、TP 流失总量有显著减小趋势,符合肥随水走的规律。裸露对照区 TN 流失总量为全园覆盖区的 4 363 倍,为全园敷盖区的 3 116 倍;裸露对照区 TP 浓度为全园覆盖区的 2 385 倍,为全园敷盖区的 1 325 倍,规律同大雨型一致,表明中雨型下地被物对控制水肥流失具有显著作用。

小雨型下,径流携带养分流失的比重占总养分流失量比重进一步增加,表明不能忽视小雨型下径流携带养分的流失,但其数量远不如泥沙携带量,泥沙携带养分流失量依然占绝

对优势。裸露对照区泥沙携带量约为清水径流携带的 125 倍,不同处理养分流失总量进一步减少,但减幅趋缓。不同生态治理措施中,仍以全园覆盖区较好,全园敷盖区其次。

2.4 壤中流及地下径流 TP 浓度变化特征

从表 3 可以看出,3 个小区壤中流及地下径流 TP 浓度均随深度的增加而降低,原因是土体的吸附和过滤作用所致,也可能因为深层土壤的 TN 含量减小。相关研究表明,土壤越深,其 TP 含量越低[15]。经多因子分析比较,对于 30 cm 处壤中流浓度而言,全园覆盖区与全园敷盖区、全园敷盖区与裸露对照区差异明显,而全园覆盖区与裸露对照区差异不明显;60 cm 处壤中流浓度,不同处理间差异不明显;105 cm 处壤中流浓度,全园覆盖区与全园敷盖区差异明显,全园敷盖区与裸露对照区、全园覆盖区与裸露对照区差异不明显。结合降雨资料和壤中流流速进行分析,壤中流及地下径流流速同其相对应的浓度成反比,流速越快,其浓度越低。观测期间不同小区同一层次壤中流及地下径流浓度与其流速的乘积约相等。

表 3 不同深度不同处理壤中流和地下径流的 TP 浓度变化

处理	土壤深度(cm)	不同时期(月-日)TP 浓度(g/kg)								
		08-07	08-15	08-24	09-01	09-08	09-15	09-28	10-07	10-15
全园覆盖	30	0.036 3	0.013 2	0.003 8	0.003 4	0.008 2	0.023 5	0.038 6	0.030 9	0.009 2
	60	0.036 8	0.028 0	0.009 7	0.008 7	0.021 0	0.020 5	0.011 8	0.009 4	0.004 1
	105	0.008 8	0.009 7	0.002 5	0.002 3	0.005 5	0.017 3	0.010 8	0.008 6	0.000 6
全园敷盖	30	0.063 1	0.077 6	0.056 9	0.051 2	0.071 2	0.028 6	0.057 5	0.046 0	0.041 4
	60	0.026 3	0.021 9	0.022 0	0.019 8	0.047 4	0.006 6	0.021 7	0.017 4	0.009 0
	105	0.007 0	0.004 0	0.009 0	0.008 1	0.019 4	0.019 5	0.030 2	0.024 1	0.000 6
裸露对照	30	0.030 2	0.014 8	0.002 8	0.002 5	0.006 0	0.058 8	0.048 8	0.039 0	0.007 8
	60	0.052 4	0.012 7	0.013 9	0.012 5	0.030 0	0.011 8	0.043 2	0.034 6	0.035 0
	105	0.005 2	0.010 7	0.008 5	0.007 7	0.018 4	0.002 5	0.007 7	0.006 2	0.003 3

3 结论与讨论

不同雨型下采取生态措施对 TN、TP 浓度起到明显的控制作用,全园覆盖效果更佳。不同雨型下不同处理径流中 N、P 的流失主要集中在径流初期,后期均匀稳定。养分流失均以侵蚀泥沙携带养分流失为主,但随着雨型的减小,径流携带养分流失量占养分总流失量的比例会增大。全园裸露区在大、中、小雨型中,清水径流携带的养分流失几乎可忽略不计,泥沙携带的养分才是真正的养分流失根源,大量浑水径流携带的小颗粒泥沙是农业非典源污染的重要根源。因此,保水固沙是控制养分流失的根本措施,在控制养分流失能力方面,地被物具有显著的功效。在不同雨型条件下,全园裸露区,侵蚀泥沙均有养分富集现象,而且随着雨型的减小而增大,其中 TN 的富集作用较 TP 的富集作用更强。TP 壤中流的浓度随着深度的增加而减小,与土壤对养分的吸附和过滤作用具有一致性。同时,壤中流浓度随着壤中流流速的增大而减小,但壤中流单位时间内的流失量整体趋于平缓,壤中流及地下径流携带的养分可忽略不计。养分流失是农业面源污染的重要来源,也是地下水污染不容忽视的环境问题,国内坡地养分流失研究主要集中在地表,而地下部分特别是对淋溶状态下养分流失的垂直分布涉及较少,今后应进一步开展细化自然降雨条件下多种养分流失垂直迁移方面的研究。

参考文献:

[1]单保庆,尹澄清,于 静. 降雨—径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报,2001,21(1):7-12.

[2]Gburek W J,Sharpley A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds[J]. Journal of Environmental Quality,1998,27(2):267-277.

[3]谢小立,王凯荣. 红壤坡地雨水产流及其土壤流失的垫面反应[J]. 水土保持学报,2002,16(4):37-40.

[4]Lu J,Huang Z Z,Han X F. Water and heat transporting hilly red soil of southern China:experiment and analysis[J]. Journal of Zhejiang University(Science),2005,6B(5):331-337.

[5]王凯荣,谢小立,周卫军,等. 红壤丘岗坡地农业开发利用的问题与对策[J]. 农业环境保护,2000,19(5):278-281.

[6]黄道友,彭廷柏,陈桂秋,等. 亚热带红壤丘陵区季节性干旱成因及其发生规律研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(1):125-126.

[7]彭廷柏,肖庆元. 湘北红壤低丘岗地农林牧鱼综合发展研究[M]. 广州:广州出版社,2000:157-161.

[8]王 涛,张维理,张怀志. 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.

[9]曹雪艳,李永梅,张怀志,等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究[J]. 水土保持学报,2010,24(3):13-17.

[10]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.

[11]Walter M T,Brooks E S,Walter M F,et al. Evaluation of soluble phosphorus loading from manure-applied fields under various spreading strategies[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,56(4):329-335.

[12]Vadas P A,Kleinman P J,Sharpley A N. A simple method to predict dissolved phosphorus in runoff from surface-applied manures[J]. Journal of Environmental Quality,2004,33(2):749-756.

[13]Barton A P,Fullen M A,Mitchell D J,et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical ultisols in Yunnan Province,China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2004,104(2):343-357.

[14]姜 娜,邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报,2011,27(6):36-41.

[15]梁菲菲,蒋先军,袁俊吉,等. 降雨强度对三峡坡耕地土壤氮,磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):81-85.