

# 南方典型红壤区不同水保措施下坡面产流产沙及稀土迁移特征

张青青<sup>1,2,3</sup>, 陈志强<sup>1,2,3</sup>, 陈志彪<sup>1,2,3</sup>, 马倩怡<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

**摘要:** 以南方典型红壤区福建省长汀县水土保持科教园5种水土保持措施为研究对象, 采集坡面产流产沙及稀土迁移数据, 以期揭示南方红壤区水保措施的减水减沙效益及对稀土迁移的阻控效应。结果表明: (1) 全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交、人工补植马尾松5种水土保持措施的年均减流率和年均减沙率分别为65.41%, 69.29%, 63.42%, 86.19%, 72.59%和91.87%, 84.21%, 81.54%, 94.13%, 81.75%。(2) 各降雨量下, 5种水土保持措施径流和泥沙的稀土迁移强度分别比对照小区低85.13%, 94.86%, 66.89%, 95.46%, 93.10%和89.92%, 80.38%, 70.18%, 93.38%, 92.73%; 且中雨时, 各水保措施下径流和泥沙的稀土迁移强度最高。(3) 除全坡面种草措施外, 其余4种水土保持措施下径流的轻稀土迁移强度比重稀土迁移强度低55.68%, 40.38%, 85.76%, 85.94%; 而5种水土保持措施下泥沙的重稀土迁移强度则比轻稀土迁移强度低82.29%, 81.25%, 78.38%, 75.35%, 77.05%。综上, 5种水土保持措施均有较好的减水减沙效益和稀土阻控效应, 其中乔灌木混交措施的效果最佳。研究结果为充分发挥水保措施在生态修复和稀土迁移中的作用提供科学依据和实证支撑。

**关键词:** 南方典型红壤区; 长汀县; 水保措施; 减水减沙; 稀土迁移

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0046-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.008

## Characteristics of Slope Runoff and Sediment Yield and REEs Migrations Under Different Soil and Water Conservation Measures in a Typical Red Soil Region of Southern China

ZHANG Qingqing<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhiqiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhibiao<sup>1,2,3</sup>, MA Qianyi<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology, Ministry of Science and Technology and

Fujian Province, Fuzhou 350007; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract:** Five kinds of soil and water conservation measures in a typical red soil region in Changting County of Fujian Province were studied, the data of slope runoff, sediment yield and rare earth elements (REEs) migration were collected to reveal the benefits soil and water conservation measures on runoff and sediment reduction and rare earth migration resistance. The results showed that: (1) The average annual runoff reduction rates and the average annual sediment reduction rates of five kinds of soil and water conservation measures (the whole slope covered by grass, closed forest, low-effect masson pine fertilization, mixture of trees with shrubs and herb, enrichment planting masson pine) were 65.41%, 69.29%, 63.42%, 86.19%, 72.59% and 91.87%, 84.21%, 81.54%, 94.13%, and 81.75%, respectively. (2) Under the rainfall, the REEs migration intensity of runoff and sediment were 85.13%, 94.86%, 66.89%, 95.46%, 93.10% and 89.92%, 80.38%, 70.18%, 93.38%, and 92.73% lower than those in control plot under five kinds of soil and water conservation measures, respectively, of which, the peak occurred in moderate rain. (3) The LREE migration intensity of runoff were 55.68%, 40.38%, 85.76% and 85.94% lower than HREE migration intensity under five kinds of soil and water conservation measures except the whole slope covered by grass, and the HREE migration intensity of sediment were 82.29%, 81.25%, 78.38%, 75.35% and 77.05% lower

收稿日期: 2017-08-28

资助项目: 福建省自然科学基金项目“南方稀土矿区芒萁的生态化学计量特征及其稀土迁移阻控效应”(2017J01462)

第一作者: 张青青(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: zqq18059119192@163.com

通信作者: 陈志强(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态恢复、水土保持研究。E-mail: soiltuqiang061@163.com

than LREE migration intensity under five kinds of soil and water conservation measures. In summary, five kinds of soil and water conservation measures have markedly benefits of runoff and sediment reduction and REE resistance, especially for of the mixture of trees with shrubs and herb. The results provide scientific basis and empirical support for making the best use the role of soil and water conservation measures applying in ecological restoration and rare earth migration.

**Keywords:** typical red soil region of Southern China; Changting County; soil and water conservation measures; runoff and sediment reduction; rare earth migration

南方红壤区属于典型的水力侵蚀区,由于年均降雨量较大,加上不合理的人为活动,使得该区成为我国水土流失最广、程度最严重的地区之一<sup>[1]</sup>。与黄土高原地区相比,南方红壤区土壤侵蚀模数较小,土体和岩石风化厚度仅为黄土厚度的2%~10%,但土壤侵蚀模数与地表可供侵蚀的土壤数量的比值较大<sup>[2]</sup>。研究<sup>[3]</sup>表明,南方红壤区只有2.3万km<sup>2</sup>的土地面积,大部分土层厚度在10cm以下。不断流失的土壤不仅会造成土地资源的浪费与流失,同时也导致了生态环境恶化,严重制约着当地生态环境的可持续发展。

南方红壤区的土壤中普遍存在稀土元素<sup>[4]</sup>。稀土元素泛指元素周期表中的15种镧系元素和与之密切相关的钪和铈。根据稀土元素电子结构的异同,一般将镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钐(Sm)、铕(Eu)称为轻稀土元素,又为铈组稀土元素;将钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镥(Lu)、Sc(钪)、Y(钇)称为重稀土元素,又为钇组稀土元素<sup>[5]</sup>。一定剂量的稀土进入机体生命活动系统中可产生多方面的负面效应,对骨骼、脑神经和生殖系统等均造成明显的生理毒害,损害动物及人体健康,且随剂量与时间不断累积,抑制作用更为明显<sup>[6]</sup>。南方红壤区由于强烈的水土流失形成了疏松的土层结构和部分裸露的地表,在水、热、气、生物和人类活动等多因素的综合影响下,特别是强酸性雨水的冲刷下,土壤中的稀土元素通过地表径流冲刷和壤中流淋滤等途径迁移至下游土壤等环境,导致土壤微生物活性、生化过程及有效性衰退,农田绝收、水体生物多样性下降,并对下游河流水网及地下水系统造成严重污染<sup>[7-8]</sup>。土壤和水体中高浓度的稀土金属污染可能会通过动植物进入食物链,进而对人体健康产生不利影响<sup>[9-10]</sup>。

以植被治理为主的水保措施是水土流失治理的重要手段,植被可以增加地面覆盖、涵养水源、降低雨滴动能,通过物理机械作用阻控水土流失<sup>[11-13]</sup>。植被在防治水土流失与改良土壤中起到了重要的作用。然而,目前的相关研究多集中于水保措施对水土流失的治理方面,而有关水保措施如何同时阻控水土流失与稀土迁移的研究却鲜见报道。福建省长汀县是南方红壤区的典型代表区域,本研究以长汀县水土保持

科教园的5种水土保持措施为研究对象,采用径流场观测法,观测每场降雨下各水保措施小区的产流产沙情况,并分析不同水保措施对坡面产流产沙以及稀土迁移的影响,以期揭示南方红壤区水土保持的水土保持效益及对稀土迁移的阻控效应,为充分发挥植被在生态修复中的作用提供科学依据和实证支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长汀县水土保持科教园设于长汀县河田镇内,位于116°38'45"—116°39'20" E, 25°18'40"—26°02'05" N,属中亚热带季风性湿润气候,年均气温17.5~18.5℃,降雨充沛,年均降雨量达1885mm,降雨年内分配不均匀,主要集中在3—8月;地貌以低山、丘陵为主;土壤以花岗岩风化发育的红壤为主,酸性较强,土层深厚且松软,速效磷、速效钾普遍缺乏,抗蚀性较差。由于长期受自然和人为因素影响,导致该地区水土流失严重,原生植被遭到严重破坏,现有植被主要以马尾松、灌丛以及荒草坡等次生植被和人工植被为主<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试验设计

在长汀县河田镇水土保持科教园共设6个标准径流小区,小区水平投影长20m,宽5m,垂直投影面积100m<sup>2</sup>,坡向西南(270°),坡度15°。将未实施水土保持措施的径流小区作为对照小区(代表南方红壤裸露坡地),其他5个径流小区分别为全坡面种草措施小区(通过全坡面种草形成的百喜草覆盖坡地)、封禁措施小区(通过移植30%的马尾松后,形成的马尾松次生林)、低效马尾松施肥措施小区(经人工施复合肥,形成的马尾松林)、乔灌草混交措施小区(通过条沟整地形成的乔灌草混交林地)、人工补植马尾松措施小区(通过人工补植马尾松后,形成的高密度人工纯林)。定期观测各小区在每场降雨下的产流量和产沙量,并分别测定各小区在暴雨、中雨和小雨3个降雨量级别(24h内的降雨量分别为55.5, 18.5, 5mm)下径流和泥沙的稀土迁移强度,用于分析不同水土保持措施的减水减沙效益及对稀土迁移的阻控效应。降雨量等级以中国气象局颁布的“降雨强度等级划分标准(内陆部分)”中的24h雨量值范围为分类的参考依据,降雨量在0.1~10mm为小雨,10~25.0mm为中雨,25~50mm为大雨,50mm以上为暴雨<sup>[15]</sup>。各径流小区的基本信息详见表1。

表 1 径流小区基本信息

水保措施	主要植被类型	植被覆盖度/%	有机质含量/%	有效磷/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效钾/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾/%	全氮/%	稀土含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
无	无	0	0.32	0.50	99.64	9.16	0.55	0.01	143.28
全坡面种草	百喜草	85	0.34	0.21	78.71	17.44	0.45	0.01	119.76
封禁	马尾松	60	0.42	4.20	201.90	3.86	1.30	0.02	103.96
低效马尾松施肥	马尾松	85	0.22	4.48	79.62	1.04	0.40	0.02	105.35
乔灌草混交	枫香、木荷、宽叶雀稗等	90	0.67	4.69	87.94	4.61	0.44	0.02	96.82
人工补植马尾松	马尾松	85	0.69	1.76	82.01	13.34	0.49	0.03	123.09

注:表中有机质含量、有效磷、全磷、有效钾、全钾、全氮和稀土含量均为 0—20 cm 土层的含量。

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品采集与处理 收集每场降雨下各径流小区坡面所产的径流和泥沙。径流量测定:坡面产流后,集流池收集地表径流,并测定集流池水深,水深乘以集流池横截面积为径流量。泥沙量测定:将集流池中的水充分搅拌均匀,然后取泥沙和水的混合样,过滤、烘干、称重,测得泥沙量。

1.3.2 减流率和减沙率 减流率和减沙率的计算是根据 GB/T 15774—2008《水土保持综合治理效益计算方法》<sup>[16]</sup>:

$$\text{减流率} = \frac{w_o - w_s}{w_o} \quad (1)$$

$$\text{减沙率} = \frac{G_o - G_s}{G_o} \quad (2)$$

式中: $w_o$ 、 $w_s$ 分别为对照小区与各水保措施小区的径流量(mm); $G_o$ 、 $G_s$ 分别为对照小区与各水保措施小区的泥沙量(kg)。

1.3.3 径流和泥沙的稀土迁移强度 径流和泥沙中单位稀土含量的测定:先用 0.22  $\mu\text{m}$  的过滤器对径流水样进行过滤,再用移液枪向过滤之后的溶液滴入 0.2 mL 电子级的  $\text{HNO}_3$ ,置于温度大约 4  $^{\circ}\text{C}$  环境下暂时保存,通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定径流中的单位稀土含量。称取 0.040 0 g 泥沙样品于聚四氟乙烯(PTFE)内胆中,加入 1.5 mL HF 和 0.5 mL  $\text{HNO}_3$ ,将内胆密封,置于涂有 PTFE 涂层的防腐高效溶液管套内,于烘箱中 150  $^{\circ}\text{C}$  加热 15 h;冷却后,取出 PTFE 内胆,加入 0.25 mL 的  $\text{HClO}_4$ ,于 150  $^{\circ}\text{C}$  电热板蒸发至近干;并加入 2 mL 去离子水及 1 mL  $\text{HNO}_3$ ,再次置于防腐高效溶液管套内,于烘箱中 150  $^{\circ}\text{C}$  回溶 15 h。冷却后,将内胆中的溶液到入 60 mL 塑料瓶中,用去离子水稀释至 40 mL,最后通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定泥沙中的单位稀土含量。

径流和泥沙的稀土迁移强度计算公式为:

$$M_r = \frac{C_r \times R}{A} \quad (3)$$

$$M_s = \frac{C_s \times S}{A} \quad (4)$$

式中: $M_r$ 为径流的稀土迁移强度( $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ),表示单位面积内随径流迁移的稀土量; $M_s$ 为泥沙的稀土迁移强度( $\text{mg}/\text{m}^2$ ),表示单位面积内随泥沙迁移的稀土量; $C_r$ 为径流中的单位稀土含量( $\mu\text{g}/\text{L}$ ); $C_s$ 为泥沙中的单位稀土含量( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $R$ 为径流量(L); $S$ 为泥沙量(kg); $A$ 为径流小区面积( $\text{m}^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水保措施下径流量和泥沙量

2.1.1 径流量 由表 2 可知,从 2007—2016 年,对照小区与全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌草混交、人工补植马尾松等措施小区的年均径流量在 101.75~724.03 mm。5 种水保措施小区的年均径流量与对照小区的年均径流量差异性显著,分别比对照小区少 479.32,514.23,462.83,622.28,534.36 mm。5 种水保措施小区间的年均径流量虽有差异,但差异不显著,其中乔灌草混交措施的年均径流量相对较少,分别比其他水保措施小区少 58.42%,51.50%,61.05%,46.36%。

由图 1 可知,从 2007—2016 年,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌草混交、人工补植马尾松等水保措施的减流率分别升高了 47.88%,69.53%,30.15%,49.32%,80.07%,相应的年均减流率分别为 65.41%,69.29%,63.42%,86.19%,72.59%。5 种水保措施的减流率虽然差异不大,但其中乔灌草混交措施的减流率最高,分别比其他水保措施高 20.78%,16.93%,22.77%,13.6%。

2.1.2 泥沙量 由表 3 可知,从 2007—2016 年,对照小区与全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌草混交、人工补植马尾松等水保措施小区的年均泥沙量在 84.11~1 014.62 kg,各水保措施小区的年均泥沙量均低于对照小区。通过对各小区的年均泥沙量进行方差分析发现,5 种水保措施小区的年均泥沙量与对照小区的年均泥沙量具有显著性差异,分别比对照小区少 903.43,800.92,804.84,930.51,765.65 kg。各水保措施小区间的年均泥沙量虽无显著性差异,但乔灌草混交措施的年均泥沙量最少,分别比其他水保措施小区少 24.36%,60.64%,59.90%,66.22%。

表 2 不同水保措施下的径流量										单位:mm
水保措施	径流量									年均径流量
	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	流量
无	951.13	411.42	532.19	951.41	616.70	734.90	527.30	748.20	1043.00	724.03±73.64a
全坡面种草	685.25	269.05	213.55	242.09	206.60	146.90	100.40	86.50	252.00	244.70±59.23b
封禁	721.52	310.66	236.17	226.38	81.32	110.40	75.30	60.40	66.00	209.79±70.76b
低效马尾松施肥	680.75	321.67	253.30	226.88	61.14	96.30	113.00	165.70	432.00	261.19±65.45b
乔灌木混交	486.44	106.89	72.91	67.67	16.80	82.20	37.70	26.10	19.00	101.75±49.20b
人工补植马尾松	805.34	304.79	200.74	155.65	18.20	83.30	50.20	40.80	48.00	189.67±82.10b

注:表中年均径流量是以“平均值±标准偏差”表示;不同小写字母表示不同小区的年均径流量具有显著性差异( $p<0.05$ )。

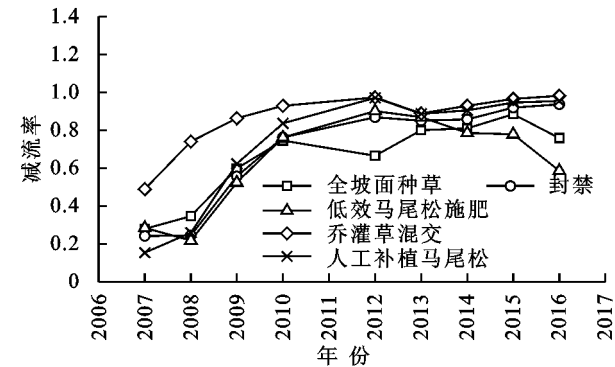


图 1 不同水土保持措施减沙率的年际变化

由图 2 可知,从 2007—2016 年,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交、人工补植马尾松等 5 种水土保持措施的减沙率分别升高了 31.24%、63.94%、37.61%、32.88%、73.82%,2016 年各水土保持措施的减沙率

均在 90% 以上,相应的年均减沙率分别为 91.87%、84.21%、81.54%、94.13%、81.75%。其中,乔灌木混交措施的年均减沙率最高,分别比其他水土保持措施高 2.26%、9.92%、12.59%、12.38%。

2.2 不同水土保持措施下径流和泥沙的稀土迁移强度

2.2.1 径流相 由表 4 可知,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交和人工补植马尾松等水土保持措施下径流的稀土迁移强度分别比对照小区径流的稀土迁移强度低 85.13%、94.86%、66.89%、95.46%、93.10%。5 种水土保持措施下径流的稀土迁移强度分别为 1.88、0.65、4.18、0.57、0.87  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ,其中乔灌木混交措施下径流的稀土迁移强度最低,分别比其他水土保持措施下径流的稀土迁移强度低 69.68%、12.31%、86.36%、53.72%。

表 3 不同水土保持措施下的泥沙量										单位:kg
水保措施	泥沙量									年均泥沙量
	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	
无	1724.24	1199.32	1156.73	1067.08	1360.96	746.00	309.60	433.43	1134.20	1014.62±149.16a
全坡面种草	552.72	171.07	151.76	100.74	2.89	0	4.70	7.56	9.30	111.19±59.73b
封禁	1111.21	419.55	231.71	115.78	2.29	0	28.10	8.95	5.70	213.70±121.78b
低效马尾松施肥	788.54	349.53	338.71	191.92	0	0	70.90	56.30	92.10	209.78±84.67b
乔灌草混交	571.10	55.49	69.73	40.51	0	0	11.10	6.38	2.70	84.11±61.49b
人工补植马尾松	1280.88	488.06	260.01	172.49	0	0	25.60	8.38	5.30	248.97±140.39b

注:表中年均泥沙量是以“平均值±标准偏差”表示;不同小写字母表示不同小区的年均泥沙量具有显著性差异( $p<0.05$ )。

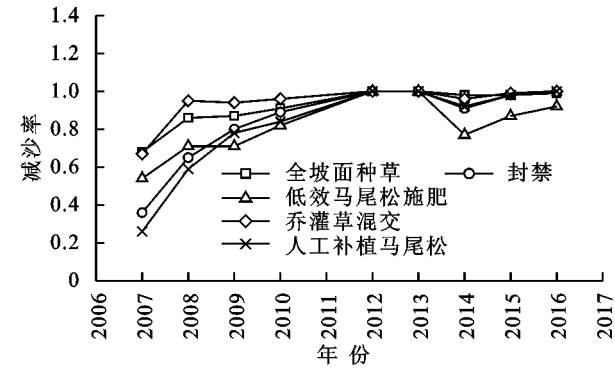


图 2 不同水土保持措施减沙率的年际变化

通过对比各降雨量下 5 种水土保持措施小区径流的稀土迁移强度可知,中雨时,各水土保持措施下径流的稀土迁移强度最高,迁移强度为 4.16  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ;暴雨次之,迁移强度为 3.14  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ,比中雨时低 24.52%;小雨时,各水土保持措施下径流的稀土迁移强度为 0.85  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ,分别比中雨、暴雨条件下径流的稀土迁移强

度低 79.57%、72.93%。

2.2.2 泥沙相 由表 5 可知,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交和人工补植马尾松等水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度分别比对照小区泥沙的稀土迁移强度低 89.92%、80.38%、70.18%、93.38%、92.73%。5 种水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度分别为 4.57、8.89、13.51、3.00、3.29  $\text{mg}/\text{m}^2$ ,其中乔灌木混交措施下泥沙的稀土迁移强度最低,分别比其他水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度低 34.26%、66.23%、77.79%、8.83%。

通过对比不同降雨量下 5 种水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度可知,中雨时,各水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度最高,为 23.84  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;暴雨次之,迁移强度为 6.12  $\text{mg}/\text{m}^2$ ,比中雨时低 74.32%;小雨时,各水土保持措施下泥沙的稀土迁移强度最低,为 3.29  $\text{mg}/\text{m}^2$ ,比中雨、暴雨条件下泥沙的稀土迁移强度低 86.18%、46.20%。

表 4 不同水保措施下径流中的稀土元素含量

单位:μg/L

元素	无			全坡面种草			封禁			低效马尾松施肥			乔灌木混交			人工补植马尾松		
	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨
Sc	0.609	0.351	0.158	0.251	0.794	/	0.475	0.996	/	0.254	0.553	0.826	0.818	1.466	/	0.824	1.414	/
Y	0.019	0.016	0.026	0.167	0.086	/	0.032	0.036	/	0.055	0.026	0.029	0.057	0.055	/	0.051	0.063	/
La	0.012	0.015	0.037	0.172	0.056	/	0.032	0.018	/	0.056	0.020	0.012	0.041	0.025	/	0.031	0.024	/
Ce	0.076	0.143	0.326	1.212	0.244	/	0.477	0.148	/	0.513	0.275	0.066	0.160	0.080	/	0.119	0.062	/
Pr	0	0.002	0.011	0.052	0.017	/	0.010	0.005	/	0.017	0.004	0.002	0.012	0.006	/	0.010	0.009	/
Nd	0.017	0.017	0.033	0.196	0.069	/	0.032	0.024	/	0.065	0.022	0.016	0.045	0.037	/	0.039	0.040	/
Sm	0.001	0	0.008	0.039	0.016	/	0.007	0.003	/	0.017	0.002	0	0.011	0.003	/	0.009	0.003	/
Eu	0	0	0	0	0	/	0	0	/	0	0	0	0	0	/	0	0	/
Gd	0.003	0.005	0.009	0.043	0.017	/	0.009	0.008	/	0.015	0.007	0.004	0.009	0.009	/	0.011	0.010	/
Tb	0	0	0	0	0	/	0	0	/	0	0	0	0	0	/	0	0	/
Dy	0.003	0.003	0.006	0.028	0.017	/	0.004	0.006	/	0.01	0.005	0.004	0.008	0.010	/	0.007	0.012	/
Ho	0	0	0	0	0	/	0	0	/	0	0	0	0	0	/	0	0	/
Er	0.002	0.002	0.003	0.018	0.010	/	0.004	0.004	/	0.005	0.006	0.003	0.005	0.006	/	0.005	0.006	/
Tm	0	0	0	0	0	/	0	0	/	0	0	0	0	0	/	0	0	/
Yb	0.004	0.005	0.003	0.020	0.012	/	0.004	0.006	/	0.007	0.006	0.005	0.005	0.008	/	0.006	0.007	/
Lu	0	0	0	0	0	/	0	0	/	0	0	0	0	0	/	0	0	/
ΣREE	0.75	0.56	0.62	2.20	1.34	/	1.09	1.25	/	1.01	0.93	0.97	1.17	1.71	/	1.11	1.65	/
ΣLREE	0.11	0.18	0.41	1.67	0.40	/	0.56	0.20	/	0.67	0.32	0.10	0.27	0.15	/	0.21	0.14	/
ΣHREE	0.64	0.38	0.21	0.53	0.94	/	0.53	1.05	/	0.34	0.61	0.87	0.90	1.56	/	0.90	1.51	/

注:“/”表示无径流;稀土元素总量ΣREE 为镧系元素、铈和钇的总和;轻稀土含量ΣLREE 为 La~Eu 6 种稀土元素之和;重稀土含量ΣHREE 为 Gd~Lu+Sc+Y 10 种稀土元素之和;因元素 Pm 含量过低,ICP-MS 无法测定,所以本研究分析的稀土元素有 La~Lu+Sc+Y,共 16 个元素。下同。

表 5 不同水保措施下泥沙中的稀土元素含量

单位:mg/kg

元素	无			全坡面种草			封禁			低效马尾松施肥			乔灌木混交			人工补植马尾松		
	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨	暴雨	中雨	小雨
Sc	10.69	10.18	9.70	9.20	9.25	/	9.98	10.2	/	9.57	9.90	10.45	9.23	9.14	/	8.98	9.18	/
Y	8.06	8.50	8.69	7.93	8.76	/	8.57	9.54	/	5.82	6.95	8.37	10.35	11.62	/	12.01	14.49	/
La	9.35	9.17	7.25	11.21	12.18	/	9.88	10.77	/	6.15	8.05	9.40	9.58	11.48	/	12.08	13.64	/
Ce	142.55	137.67	116.21	111.66	111.68	/	119.98	115.16	/	80.10	80.67	95.58	85.80	86.62	/	110.36	103.61	/
Pr	2.23	2.18	1.61	2.34	2.81	/	2.24	2.72	/	1.42	1.82	2.25	2.39	3.10	/	3.06	3.67	/
Nd	8.51	8.26	6.13	8.65	10.41	/	8.77	10.39	/	5.52	7.01	8.52	9.42	12.06	/	11.87	14.34	/
Sm	1.58	1.52	1.25	1.65	1.82	/	1.55	1.68	/	0.99	1.27	1.54	1.66	1.99	/	2.23	2.46	/
Eu	0.28	0.26	0.20	0.30	0.34	/	0.28	0.32	/	0.16	0.23	0.28	0.29	0.36	/	0.37	0.45	/
Gd	2.46	2.32	1.99	2.23	2.49	/	2.32	2.49	/	1.48	1.74	2.07	2.27	2.54	/	2.90	3.19	/
Tb	0.17	0.18	0.16	0.19	0.21	/	0.18	0.22	/	0.10	0.14	0.17	0.21	0.26	/	0.29	0.35	/
Dy	1.41	1.45	1.42	1.48	1.59	/	1.44	1.58	/	1.01	1.20	1.40	1.69	1.96	/	2.05	2.37	/
Ho	0.22	0.25	0.26	0.23	0.25	/	0.24	0.26	/	0.14	0.18	0.22	0.29	0.32	/	0.35	0.42	/
Er	0.93	1.00	1.08	0.90	0.95	/	0.95	1.02	/	0.66	0.75	0.92	1.10	1.26	/	1.26	1.49	/
Tm	0.07	0.09	0.12	0.07	0.08	/	0.08	0.08	/	0.04	0.05	0.07	0.1	0.11	/	0.13	0.17	/
Yb	1.10	1.24	1.49	1.08	1.06	/	1.04	1.08	/	0.85	0.89	1.03	1.23	1.27	/	1.36	1.60	/
Lu	0.11	0.14	0.18	0.10	0.12	/	0.10	0.12	/	0.07	0.08	0.10	0.13	0.15	/	0.15	0.21	/
ΣREE	189.70	184.41	157.74	159.21	163.99	/	167.58	167.63	/	114.09	120.94	142.38	135.73	144.24	/	169.46	171.64	/
ΣLREE	164.48	159.06	132.65	135.80	139.23	/	142.69	141.03	/	94.35	99.06	117.57	109.13	115.60	/	139.98	138.17	/
ΣHREE	25.22	25.35	25.09	23.41	24.76	/	24.89	26.60	/	19.74	21.88	24.81	26.60	28.64	/	29.48	33.47	/

2.3 不同水保措施下径流和泥沙的轻重稀土迁移强度

2.3.1 径流相 由图 3、图 4 可知,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交和人工补植马尾松等水保措施下径流的轻、重稀土迁移强度分别比对照小区径流的轻、重稀土迁移强度低 61%,94%,50%,98%,97%和 93%,95%,73%,95%,92%。除

全坡面种草措施外,其他水保措施小区均表现为径流的轻稀土迁移强度低于重稀土迁移强度,轻稀土迁移强度分别比重稀土迁移强度低 55.68%,40.38%,85.76%,85.94%。

由不同降雨量下径流的轻、重稀土迁移强度可知,中雨时,5 种水保措施下径流的轻、重稀土迁移强

度分别为 1.10,3.06  $\mu\text{g}/\text{m}^2$ ;暴雨条件下径流的轻稀土迁移强度比中雨时高 77.04%,重稀土迁移强度比中雨时低 61.01%;小雨时,5 种水土保持措施下径流的轻、重稀土迁移强度最低,分别比中雨、暴雨条件下低 92.37%,75.05%和 95.69%,36.02%。

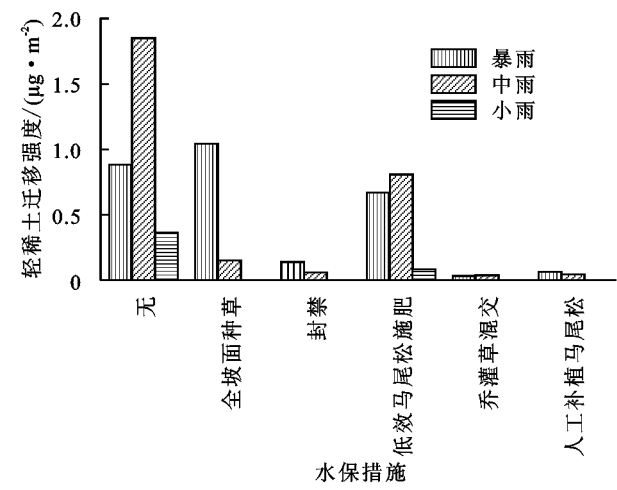


图 3 不同水土保持措施下径流的轻稀土迁移强度

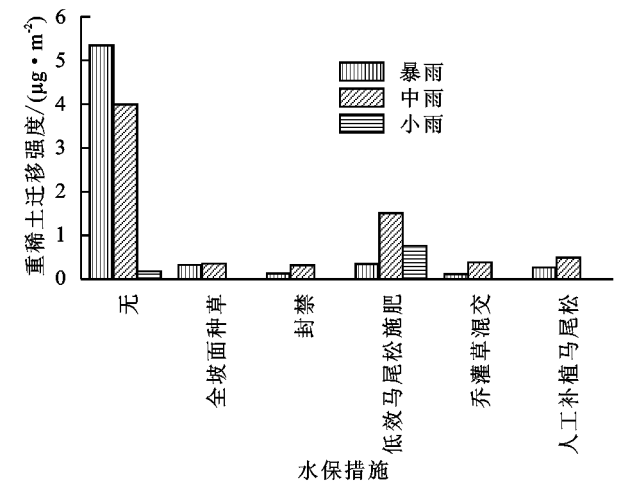


图 4 不同水土保持措施下径流的重稀土迁移强度

2.3.2 泥沙相 由图 5、图 6 可知,全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交和人工补植马尾松等水土保持措施下泥沙的轻、重稀土迁移强度分别比对照小区泥沙的轻、重稀土迁移强度低 90.09%,80.89%,71.63%,93.85%,93.16%和 88.84%,77.19%,60.96%,90.35%,90.01%。5 种水土保持措施均表现为泥沙的重稀土迁移强度低于轻稀土迁移强度,重稀土迁移强度分别比轻稀土迁移强度低 82.29%,81.25%,78.38%,75.35%和 77.05%。

通过对比不同降雨量下泥沙的轻、重稀土迁移强度可知,中雨时,5 种水土保持措施下泥沙的轻、重稀土迁移强度最高,分别为 19.77,4.08  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;暴雨次之,比中雨时低 74.34%,74.25%;小雨时,各水土保持措施下泥沙的轻、重稀土迁移强度最低,分别比中雨、暴雨条件下低 86.24%,85.92%和 46.38%,45.32%。

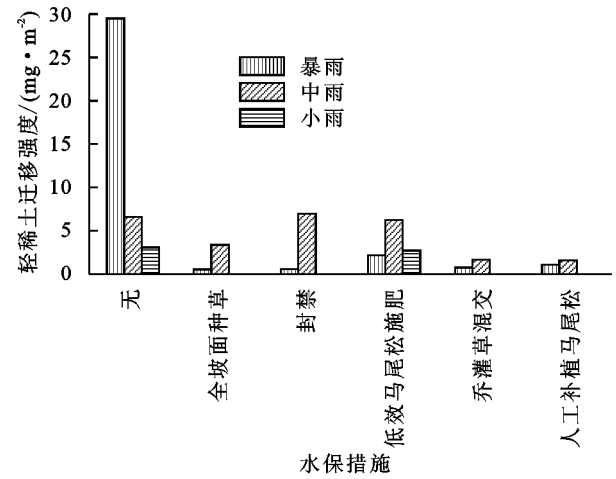


图 5 不同水土保持措施下泥沙的轻稀土迁移强度

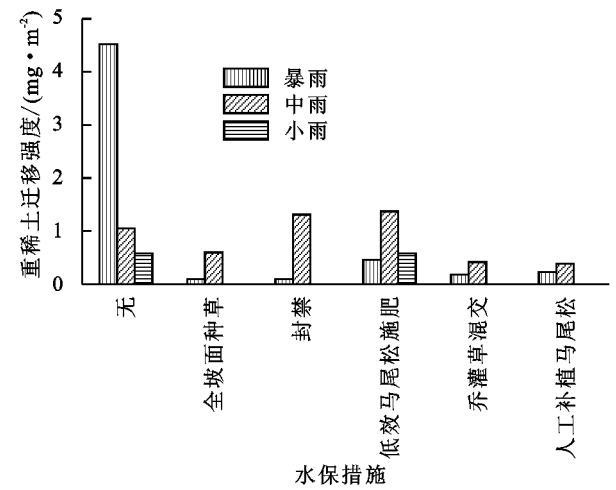


图 6 不同水土保持措施下泥沙的重稀土迁移强度

### 3 讨论

#### 3.1 不同水土保持措施的减水减沙效益

本研究表明,5 种水土保持措施小区的年均径流量和年均泥沙量均低于对照小区,相应的年径流量和年泥沙量逐年降低,减水减沙效益逐年提高。这主要是因为无植被覆盖的情况下,土壤表层受到雨滴的直接打击后,易形成结皮,降低了土壤的入渗,孔隙度变小,从而增加了地表径流量<sup>[17]</sup>。通过水土保持措施的实施,避免了土壤结皮的形成;同时,植被在降雨过程中通过截流、渗透等形式对降雨进行再分配,延缓了径流的形成,有效减少了坡面径流,起到了良好的水土保持效益<sup>[18]</sup>。随着时间的推移,各水土保持措施的减水减沙效益逐年提高,一方面,是因为各小区的植被覆盖度逐年升高,植被对降雨量截留增加,根系逐渐发达,土壤团聚结构得以改善;另一方面,是因为地表生物量提高,地表粗糙度增加,产流速度减缓,从而增加了土壤的渗透量,使地表径流逐渐较少<sup>[19-20]</sup>。

分析可知,5 种水土保持措施均有较好的减水减沙效益。究其原因,全坡面种草措施通过全坡面种植百喜草有效减少了坡面产流量和泥沙量,一方面,是因为

草本植物枯枝落叶中灰分含量丰富,能有效改善土壤肥力<sup>[21]</sup>,增加了土壤的下渗率,延缓了产流时间。另一方面,是因为百喜草属多年禾生草,生长迅速,地上部分的叶、匍匐茎及其枯落物覆盖地表能够减小雨滴击溅,削减降雨动能<sup>[18]</sup>。封禁措施直接避免了人和动物的踩踏,改善了植物生存的小环境<sup>[22]</sup>,植被自然恢复状况较好,使得植被减少径流的功能得以发挥,径流量减少;另外,植被的截留作用减少了降雨与地表的接触面,雨滴溅蚀量减少,泥沙量得以降低。低效马尾松施肥,通过人工施肥提高了土壤的养分含量,有助于团粒结构的形成,改善了土壤的透水性、蓄水能力及通气性,使林下土壤降雨入渗较快,径流损失较少<sup>[23]</sup>;而径流又是泥沙的主要载体<sup>[24]</sup>,因此泥沙量相对减少。乔灌草混交措施小区通过水保措施的实施形成了复杂的冠层立体结构,对降雨进行了再分配,减少了林地地表的降雨量,进而减少了径流量的产生;与此同时,该小区林下植被根系也非常发达,根系产生的根网效应能束缚土壤颗粒,增强土壤的凝聚力,从而大大提高了土壤的抗蚀性,泥沙量降低<sup>[25]</sup>。植被的水土保持效益与植被覆盖度密切相关,人工补植马尾松形成的马尾松纯林郁闭度和植被覆盖度均较高(85%),有效减少了林下降雨量,坡面径流量减少,继而削弱了降雨对土壤的冲刷力,泥沙量降低。

### 3.2 不同水保措施下坡面土壤的稀土迁移规律

稀土元素可溶态迁移仅占百分之一,99.5%以上的稀土元素被土壤颗粒物所吸附,随土壤侵蚀而发生迁移<sup>[26]</sup>。因此,泥沙流失量在一定程度上决定了稀土的迁移强度,换言之,产沙量越多,稀土的迁移强度也就越高。本研究表明,中雨时,5种水保措施下径流和泥沙的稀土迁移强度比暴雨、小雨条件下径流和泥沙的稀土迁移强度高。本研究认为这主要是受采样时间的影响。暴雨时,径流和泥沙的采集季节是夏季,而中雨和小雨时,径流和泥沙的采集季节是春季。陈学兄<sup>[27]</sup>、扶卿华等<sup>[28]</sup>研究发现中国夏季植被的覆盖度高于春季的植被覆盖度,且在一定条件下,土壤侵蚀与植被覆盖度呈负相关<sup>[29]</sup>。因此夏季土壤的流失量比春季少,故而单位面积内随径流和泥沙迁移的稀土量也较春季少。

全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌草混交和人工补植马尾松等水保措施下稀土的迁移强度显著低于对照小区的稀土迁移强度,这说明水保措施的实施有效阻控了稀土迁移。由前面分析可知,在无植被覆盖的情况下,坡面在强降雨的侵蚀下极易发生水土流失,稀土元素随土壤侵蚀进入地表径流而发生迁移,因此对照小区单位面积内的稀土迁移量最高。但由于土壤稀土流失有两个主要途径,一是随泥沙流

失,二是随水流失。各小区的土壤是均匀混合,单位土壤里面的稀土含量一致,部分泥沙流失后,并不会降低径流小区余下泥沙的稀土含量,而泥沙中的稀土溶于水并随水流失,会导致土壤稀土含量下降。但后者的数量极少,稀土主要是随泥沙流失,因此对照小区残留的土壤里面稀土含量依然最高。水保措施的实施增加了植被覆盖度,减少了降雨对地表的直接冲刷,增强了土壤抗蚀力,有效阻控了稀土迁移。然而,因5种水保措施小区植被覆盖度的不同,再加上不同植被对稀土元素的吸收、转移和积累特征也表现出较大的差异,因此不同水保措施对稀土迁移的阻控效应也不尽相同。研究结果表明,乔灌草混交措施对稀土迁移的阻控效应最佳,这主要是因为乔灌草混交措施小区的植被覆盖度(90%)最高,可有效阻控水土流失,再加上宽叶雀稗和木荷等属于根部囤积型植物<sup>[30]</sup>,可以将稀土元素吸收到地下部根系中,减少了随径流和泥沙迁移的稀土含量。

在坡面产流产沙过程中,径流的重稀土迁移强度高于轻稀土迁移强度,而在泥沙中则反之,这与 Migaszewski 等<sup>[31]</sup>的研究结果相一致。分析其原因,一方面,是由稀土元素的地球化学特性所决定。福建省长汀县地处中亚热带季风气候区,化学风化作用和淋溶作用强烈,土壤在强降雨的冲刷下,重稀土元素较轻稀土元素更容易在溶液中形成重碳酸盐类化合物和有机络合物,被优先溶解迁移<sup>[32]</sup>,且迁移率随稀土原子序数的增大而增大。另一方面,是由黏土矿物对稀土元素吸附性能的差异所决定<sup>[33]</sup>。吸附稀土元素的黏土矿物主要是比表面积大的矿粒以及层状结构的硅酸盐矿物(蒙脱石、埃洛石和高岭石),它们对稀土元素的作用力表现为  $\text{Sc}^{3+} > \text{La}^{3+} > \text{Ce}^{3+} > \text{Pr}^{3+} > \text{Nd}^{3+} > \text{Sm}^{3+} > \text{Eu}^{3+} > \text{Gd}^{3+} > \text{Tb}^{3+} > \text{Dy}^{3+} > \text{Ho}^{3+} > \text{Y}^{3+} > \text{Er}^{3+} > \text{Tm}^{3+} > \text{Yb}^{3+} > \text{Lu}^{3+}$ <sup>[34]</sup>。由此可知,黏土矿物对轻、重稀土元素的吸附能力存在差别,所以在降雨的淋滤下和弱酸性土壤介质中,稀土元素之间发生迁移变异,导致吸附能力较差的重稀土元素优先释放到溶液中,随径流而发生迁移<sup>[35]</sup>;而吸附能力较强的轻稀土元素则被黏土矿物所吸附,优先沉积下来,随土壤颗粒物的流失而发生迁移。

### 3.3 稀土迁移对生态环境的影响

长汀县的土壤类型为红壤,在高温多雨的条件下土壤矿物质的化学分解作用强烈,铁和铝的氢氧化物积累,形成高岭土和多水高岭土组成的黏土矿物,在这种条件下形成的土壤易于积累稀土元素<sup>[36]</sup>,且稀土元素一般富集在土壤剖面的表层,随着土壤颗粒物的流失而发生迁移<sup>[37]</sup>。温小军<sup>[38]</sup>研究发现稀土元素在降雨的过程中有随水体的流动向低海拔区域发生

迁移的趋势,可导致下游区域土壤和水体中稀土元素不断富集。长汀县降雨量集中,多以暴雨的形式出现,试验结果表明,在暴雨的条件下,无植被覆盖地随径流和泥沙迁移的稀土元素含量为  $189.71 \text{ mg/kg}$ ,稍高于中国土壤中稀土元素含量 ( $186.76 \text{ mg/kg}$ )<sup>[39]</sup>,再加上该区域土壤酸性较强,稀土元素的活性和生物有效性较高,极容易被植物吸收和积累,并通过食物链进入人体。我们前期研究发现,长汀县稀土矿区居民通过蔬菜和井水摄入的稀土元素终身日均摄入量之和为  $12.47 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ <sup>[40]</sup>,高于稀土元素对人体亚临床损害剂量的临界值 ( $6.0 \sim 6.7 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ) 的范围<sup>[41]</sup>。由此说明,稀土迁移所导致的稀土元素在土壤、水体中的超量积累在一定程度上会给周围居民的身体健康和生态环境带来威胁。

## 4 结论

(1)全坡面种草、封禁、低效马尾松施肥、乔灌木混交、人工补植马尾松 5 种水土保持措施均有较好的减水减沙效益,且不同水土保持措施的减水减沙效益均逐年提高。

(2)在不同降雨量下,5 种水土保持措施的实施均有效阻控了稀土迁移,其中乔灌木混交措施对稀土迁移的阻控效应最佳。由于不同采样季节植被覆盖度不同,中雨时,5 种水土保持措施下坡面径流和泥沙的稀土迁移强度最高,暴雨次之,小雨最低。

(3)5 种水土保持措施下径流的轻稀土迁移强度低于重稀土迁移强度,而泥沙中则表现为轻稀土迁移强度高于重稀土迁移强度。

### 参考文献:

- [1] 水利部. 中国水土流失防止与生态安全, 南方红壤区卷 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 22-27.
- [3] 梁音, 张桃林, 史德明. 南方红壤丘陵区土壤侵蚀评价//红壤生态系统研究[M]. 第 3 集. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 50-56.
- [4] 丁士明, 梁涛, 张自立, 等. 稀土对土壤的生态效应研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(2): 157-163.
- [5] 杨胜奇. 稀土在金属表面处理工艺中的应用技术(1): 稀土的概念和基本情况[J]. 材料保护, 2008, 41(4): 76-77.
- [6] 陈祖义, 朱旭东. 稀土元素的骨蓄积性、毒性及其对人群健康的潜在危害[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(1): 88-91.
- [7] Gao Z Q, Zhou Q X. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 12(12): 2915-2922.
- [8] 李小飞. 稀土采矿治理土地壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [9] 金妹兰, 黄益宗, 王斐, 等. 江西典型钨矿开采对周边环境稀土元素含量的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 3(14): 1328-1335.
- [10] Chua H. Bio-accumulation of environmental residues of rare earth elements in aquatic flora eichhornia crassipes, (Mart.) Solms in Guangdong Province of China [J]. Science of The Total Environment, 1998, 214(1/3): 79-85.
- [11] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407.
- [12] 周毅, 魏天兴, 解建强, 等. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 12-16.
- [13] 李钢, 梁音, 曹龙熹. 次生马尾松林下植被恢复措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 25-31.
- [14] 李桂静, 崔明, 周金星, 等. 南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 1-5.
- [15] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7): 1335-1347.
- [16] General administration of quality supervision, inspection and quarantine of china. GB 15774-2008 Calculation method of benefit in soil and water conservation [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [17] 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 9-11.
- [18] 梁娟珠. 不同植被措施下红壤坡面径流变化特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 159-163.
- [19] 章俊霞, 李小军, 左长清. 南方红壤入渗影响因素研究[J]. 中国水土保持, 2008(6): 27-29.
- [20] 张成梁, 程冬兵, 刘士余. 红壤坡地果园植草的水土保持效应[J]. 草地学报, 2006, 14(4): 365-269.
- [21] 文亦芾, 毕玉芬, 董亚芳. 金沙江流域退耕还草地水土保持效益分析研究[J]. 土壤, 2006, 38(4): 489-493.
- [22] 郑本暖, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 亚热带红壤严重退化生态系统封禁管理后生物多样性的恢复[J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 57-60.
- [23] 黄少燕. 红壤侵蚀退化地不同生态恢复措施对土壤养分影响研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 38-42.
- [24] 汪丽娜, 穆兴民, 张晓萍, 等. 黄河流域粗泥沙集中来源区径流及输沙特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 60-65.
- [25] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 23-27.