

不同水土保持措施下红壤坡地泥沙及氮磷流失对雨型的响应

梁媛^{1,2}, 陈晓安^{1,3}, 伍冰晨^{1,3}, 奚同行^{1,3}, 徐晓晗^{1,4}

(1. 江西省水利科学院 流域水土保持江西省重点实验室, 江西 南昌 330029;
2. 华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 3. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 江西 南昌 330029; 4. 江西善水科技发展有限公司德安分公司, 江西 九江 330400)

摘要: [目的] 探究不同保持措施下地表径流泥沙及氮磷流失对雨型的响应机制, 优化南方红壤坡地水土保持措施配置, 为该区域水土流失治理提供理论依据。[方法] 以南方红壤区为研究区域, 基于 2019—2022 年自然降雨数据, 采用野外径流小区定位观测试验方法, 针对果园清耕对照、植物措施(M₁)、横坡间作(M₂)、顺坡间作(M₃)、梯田工程措施(M₄)、梯田工程+植物措施(M₅)等不同水土保持措施配置, 系统分析径流泥沙及氮磷流失对雨型的响应特征。[结果] 研究区雨型构成以短历时、大雨强的前峰型(发生频率 41.18%)和中历时、中雨强的中峰型(47.06%)为主, 长历时、小雨强的后峰型占比最小。植物措施(M₁)与梯田工程+植物措施(M₅)均能显著减少径流泥沙及氮磷流失。前峰型下, M₁径流深、泥沙流失量分别削减 61.2%, 91.3%, M₅削减 58%, 94%; 中峰型下, 二者径流深削减 70.6% 和 54.2%, 泥沙量削减 80.8% 和 82.6%; 后峰型中, M₁仍削减径流深 60.5% 和泥沙量 74.7%。氮磷流失控制方面, M₁和 M₅显著降低了所有雨型下的总磷浓度, 其中, 前峰型分别削减 32.5% 和 36.1%, M₅对总氮削减达 16.3%~21.3%。顺坡间作(M₃)因垄向与坡向一致, 前峰型下泥沙量(0.424 kg)和总磷浓度(0.127 mg/L)较 CK 增加 42.3% 和 53.0%, 加剧了侵蚀风险。[结论] 南方红壤坡地不同水土保持措施中, 植物措施和梯田工程+植物措施通过植被截留与工程截蓄作用, 可高效阻控多雨型下的水土流失, 在南方红壤坡地水土流失治理应予以重视。

关键词: 雨型; 产流产沙; 氮、磷流失; 水土保持措施

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0010-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 梁媛, 陈晓安, 伍冰晨, 等. 不同水土保持措施下红壤坡地泥沙及氮磷流失对雨型的响应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 10-18. Liang Yuan, Chen Xiaohan, Wu Bingchen, et al. Response of sediment, nitrogen and phosphorus loss to rainfall patterns under different soil and water conservation measures on red soil slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 10-18. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.037; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.037.

Response of sediment, nitrogen and phosphorus loss to rainfall patterns under different soil and water conservation measures on red soil slopes

Liang Yuan^{1,2}, Chen Xiaohan^{1,3}, Wu Bingchen^{1,3}, Xi Tonghang^{1,3}, Xu Xiaohan^{1,4}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 4. De'an Branch, Jiangxi Shanshui Science and Technology Development Co., Ltd, Jiujiang, Jiangxi 330400, China)

Abstract: [Objective] The response mechanism of runoff surface sediment and nitrogen and phosphorus loss to rainfall patterns under different holding measure was studied to optimize the scientific configuration of soil and water conservation measures on southern China's red soil slopes, and provide a theoretical basis for soil and water

收稿日期: 2025-03-17

修回日期: 2025-05-21

采用日期: 2025-05-22

资助项目: 江西省水利厅科技项目“红壤丘陵区果园多尺度氮磷迁移转化及防控技术研究”(202224ZDKT12), “红壤区小流域水土保持监测技术规范—水文泥沙监测技术规范”(202425BZKT01); 江西省技术创新引导类计划项目(2023KSG01002, 20212AEI91011)

第一作者: 梁媛(2000—), 女(汉族), 山东省武城县人, 硕士研究生, 研究方向为红壤坡地水土保持。Email: 17863975149@163.com。

通信作者: 陈晓安(1983—), 男(汉族), 安徽省南陵县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事土壤侵蚀机理等研究。Email: onlycxa@163.com。

erosion management in the region. [Methods] Taking the southern red loam area as the study area, based on natural rainfall data from 2019 to 2022, field runoff plot observations were employed to systematically evaluate differently configured soil and water conservation measures, such as orchard clear-tillage control, planting measures (M_1), cross-slope intercropping (M_2), down-slope intercropping (M_3), terracing plus planting (M_4), and terracing engineering (M_5). Soil and water conservation measures were configured to systematically analyze runoff sediment characteristics and nitrogen and phosphorus loss in response to rainfall patterns. [Results] The composition of rainfall patterns in the study area was dominated by an advanced pattern comprising short-duration, high-intensity rainfall (41.18%) and an intermediate pattern comprising medium-duration, medium-intensity rainfall (47.06%), while the delayed pattern of long-duration, low-intensity rainfall accounted for the smallest proportion. Both plant measures (M_1) and terracing plus plant measures (M_5) significantly reduced runoff sediment and losses of nitrogen and phosphorus. Under the advanced pattern, runoff depth and sediment loss were reduced by 61.2% and 91.3% for M_1 , and by 58% and 94% for M_5 ; under the intermediate pattern, runoff depth was reduced by 70.6% and 54.2%, and the amount of sediment was reduced by 80.8% and 82.6%; under the delayed pattern, runoff depth was still reduced by 60.5% and the amount of sediment was reduced by 74.7% for M_1 . In terms of controlling nitrogen and phosphorus loss, M_1 and M_5 significantly reduced total phosphorus concentration under all rainfall patterns, with 32.5% and 36.1% reductions in the advanced pattern, and M_5 reduced total nitrogen by 16.3%—21.3%. Downslope intercropping (M_3) increased the amount of sediment (0.424 kg) and total phosphorus concentration (0.127 mg/L) by 42.3% and 53.0%, respectively, under the advanced pattern when compared to CK, because the erosion risk was exacerbated by the matching ridge and slope orientations. [Conclusion] Among different soil and water conservation measures for southern China's red soil slopes, plant measures and also terraced field projects combined with plant measures, can effectively prevent and control soil erosion under rainy conditions through engineering and the interception and storage of vegetation. Therefore, these measures should be given due attention in soil erosion control on these slopes.

Keywords: rainfall patterns; runoff sediment; nitrogen and phosphorus loss; soil and water conservation measures

中国南方红壤坡地因土质黏重、保肥能力弱,叠加集中暴雨和地形起伏因素,开发后易导致地表裸露和水土流失^[1]。降雨特征作为影响坡面水土流失的关键因素^[2],其雨型特征综合反映降雨的特性^[3],对产流产沙的影响显著,但相关研究中雨型分类方法存在差异。自然降雨研究中,基于聚类分析方法的雨型划分存在争议,秦伟等^[4]、Liu Y等^[5]认为短历时、大雨强、小雨量是南方红壤区典型侵蚀雨型,而王赫等^[6]却得出小雨强、小雨量雨型对产流产沙贡献更大的结论,表明传统聚类方法在红壤区的适用性存在局限,难以准确反映降雨过程^[7]。人工模拟降雨试验则侧重雨强时序分配,不同研究者^[8-10]针对不同地区划分多种雨型,如增强型、减弱型、均值型等,发现同一雨强的时序差异会影响侵蚀程度。但其固定强度梯度与自然降雨的随机特性存在本质差异。因此,深入探究自然降雨雨型对红壤区产流产沙及氮磷流失的影响机制,对理解该区域水土流失过程至关重要。

针对红壤坡地特殊侵蚀环境,水土保持措施通过改变地表覆盖、入渗及地表径流等影响坡面产流

产沙特征^[11],现有措施体系主要涵盖植被、工程和耕作三大类型。植被措施通过冠层截留和根系固土实现减流抑沙,工程措施借助梯田、反坡台阶等地形改造拦截泥沙并降低侵蚀动力^[12-13],耕作措施利用横坡垄作配合秸秆覆盖同步削减径流及氮磷^[14]。不同措施对养分流失形态存在差异化调控,植被措施更有效控制溶解态氮磷浓度,而工程措施对颗粒态养分的截留优势显著。然而现有研究对过程雨型与水保措施的协同作用机制仍缺乏系统解析,特别是雨强时序变化与措施的相互作用亟待阐明。

依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),总氮(TN)与总磷(TP)是地表水污染监测中的常用指标,能综合反映水体中各形态氮、磷总量,是衡量水体富营养化的关键指标,对评估地表水污染、防治富营养化至关重要^[15-16]。研究表明,降雨雨型通过调控径流动力过程显著影响氮磷流失特征^[17],水土保持措施则通过改变地表微环境实现差异化调控^[11]。尽管已有研究建立了雨强-产沙-养分的统计关系,但关于自然降雨过程对氮磷流失的影响仍存在认知缺口。

鉴于此,本研究依托南方红壤区长期定位观测径流小区,以自然降雨过程数据为基础,研究不同水土保持措施条件下径流泥沙及氮磷流失对雨型的响应,揭示降雨过程和下垫面条件对红壤区土壤侵蚀的影响,为该地区径流泥沙与养分流失问题的解决提供理论支撑与实践指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于江西省德安县水土保持生态科技园内(115°42'38"—115°43'06"E,29°16'37"—29°17'40"N),该区域属亚热带季风气候区,降水季节分配不均,年平均降水量1469 mm,其中70%以上发生在4—9月。年平均气温16.7℃,年日照时数1700~2100 h,无霜期245~260 d。

园内地带性植被为亚热带常绿阔叶林,地貌类

型为浅丘岗地,海拔高度30~100 m,坡度多在5°~25°。园区土壤主要为第四纪红黏土发育的土壤,土层平均厚度60—100 cm。园区位于中国红壤的中心区域,属全国土壤侵蚀二级类型区的南方红壤区,土壤、地形条件具有典型代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

本研究的试验观测径流小区为6个坡度12°的标准径流小区,分别设置5个不同水土保持措施处理和1个清耕对照(表1),观测单场降雨下6个小区的径流泥沙以及氮磷流失量。

黄豆于5—6月种植,9—10月收获;萝卜通常于6月收获,待10月割黄豆后再次种植。施肥时,各试验小区施肥量相同,均参照当地常规施肥量。每区施钙镁磷肥(含磷)1 kg,进口复合肥(含氮等)1.5 kg,以确保施肥量既保持一致又符合当地常规标准。

表1 试验小区的设计与处理

Table 1 Design and treatment of experimental plots

水土保持措施	小区名称	小区编号	规格	处理
无措施对照	果园清耕	CK	5 m×20 m	仅种植柑橘,无其他措施,植被覆盖度20%,植被结构为纯林
植物措施	三叶草、紫云英带状覆盖	M ₁	5 m×20 m	三叶草、紫云英带状覆盖+柑橘,植被覆盖度70%,植被结构为林—草型
耕作措施	横坡间作	M ₂	5 m×20 m	间种黄豆和萝卜+柑橘,植被覆盖度60%,植被结构为林—农型
	顺坡间作	M ₃	5 m×20 m	间种黄豆和萝卜+柑橘,植被覆盖度60%,植被结构为林—农型
梯田工程措施	普通水平梯田	M ₄	5 m×20 m	普通水平梯田,无前埂后沟,梯壁不植草,梯面种植柑橘,植被覆盖度20%
梯田工程+植物措施	前埂后沟+梯壁植草水平梯田	M ₅	5 m×20 m	梯面种植柑橘,梯壁植百喜草,每一台面外侧设有埂坎,埂坎高0.3 m,顶宽0.3 m;排水沟位于梯田内侧,深0.3 m,宽0.2 m;植被覆盖度45%

注:表中各小区植被覆盖度因水土保持措施本身特性(耕作措施、植被措施等季节性变化)而呈现相应数值,覆盖度不作为控制性条件,其差异由措施本身造成。

1.2.2 雨型划分方法

参考Wang Wenting等^[18]的雨型分类方法,对降雨数据进行标准化处理,具体步骤为以累积降雨历时(t , $t=1, 2, \dots, T$)除以总历时(T)作为横坐标,以累积降雨量(P_t)除以总降雨量(P)作为纵坐标,得到标准化的累积降雨过程曲线,根据降雨量的集中出现时间——前1/3,中间1/3,后1/3位置处,将降雨过程分为前峰型、中峰型、后峰型。

1.3 数据处理与分析

(1) 降雨数据。通过科技园气象观测场内安装的自记雨量计进行测定,每隔5 min自动记录降雨量、降雨历时、30 min最大降雨强度等降雨变量。于2019—2022年共观测到降雨149场,其中产生径流泥沙的侵蚀性降雨共105场。为确保分析的科学与数据完整性,后续依据降雨历时、降雨量、雨型以及氮磷数据完备性等要素进行严格筛选,最终确定51场降

雨用于径流泥沙及氮磷流失特征的精准分析。

通过对4 a的降雨事件与历史降雨的丰枯分类进行分析^[19-20],发现2019年(年降雨量1207.7 mm)和2022年(年降雨量1123.6 mm)为枯水年的代表年份,2021年(年降雨量1401.1 mm)为平水年的代表性年份,2020年(年降雨量1851.1 mm)为丰水年的代表性年份,涵盖了丰、平、枯降雨年份,能够代表试验区不同年份的降雨特征。

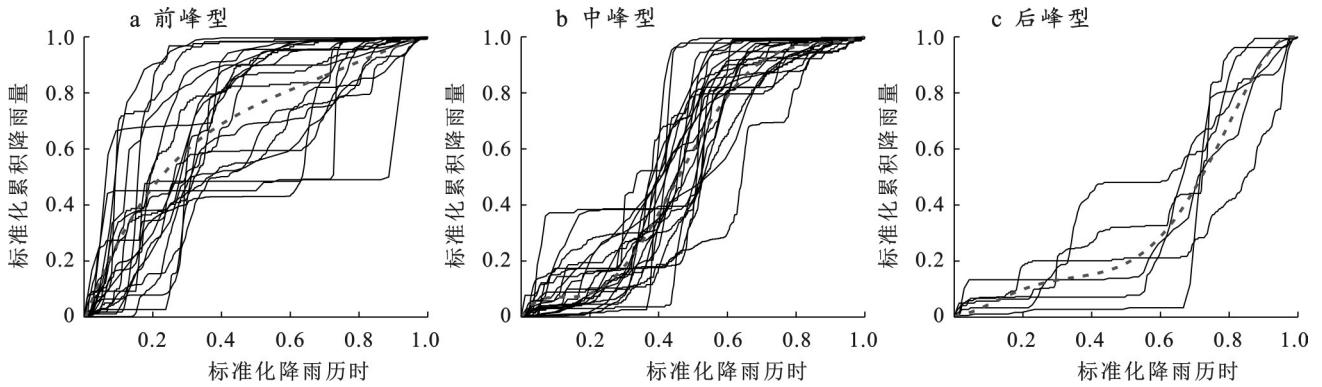
(2) 径流泥沙和氮磷数据。本研究通过径流小区开展产流产沙观测,获取单场降雨的产流量和产沙量,并进一步计算径流深。各小区产流后,将径流池内径流搅拌均匀并取浑水样,用于测定总氮、总磷浓度(mg/L)。其中,总氮浓度采用盐酸萘乙二胺分光光度法(HJ 667—2013)测定,总磷浓度采用钼酸铵分光光度法(HJ 671—2013)测定。所有数据采用Excel 2019进行整理分析,利用Origin 2022进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 雨型划分及其特征

图 1 展示了德安县水土保持生态园内 3 种不同雨型的无量纲降雨变化过程。由图 1 可知,前峰型在降

雨前 1/3 时段的斜率呈现出陡升状态,累积降雨超过总降雨量的 40%。中峰型在中间 1/3 时段的斜率呈现出陡升状态,总降雨量的 40% 集中在该时段内。后峰型在后 1/3 时段的斜率呈现出陡升状态,总降雨量的 40% 集中在该时段内。



注:实线为各雨型累积无量纲曲线,虚线为拟合曲线。

图 1 德安县水土保持生态园内不同雨型累积无量纲曲线

Fig.1 Cumulative dimensionless curves for different rainfall patterns in soil and water conservation ecological science and technology park in De' an County, China

对不同雨型的降雨特征值,包括降雨量、降雨历时、 I_{30} 等进行分析,结果表明(表 2),不同雨型的发生频率存在显著差异,前峰型降雨发生 21 场,占比

41.18%;中峰型发生 24 场,占比 47.06%;后峰型发生 6 场,占比 11.76%,表明研究区降雨以前峰型和中峰型为主,后峰型相对较少。

表 2 德安县水土保持生态园内不同雨型的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of different rain patterns in soil and water conservation ecological science and technology park in De' an County, China

降雨类型	场次	降雨特征值	最大值	最小值	中位数	平均值±标准误差
前峰型	21	降雨历时/min	1 710.0	75.0	565.0	710.1±119.1
		降雨量/mm	109.1	8.8	26.6	37.6±1.5
		$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	74.0	4.8	19.8	25.2±4.2
中峰型	24	降雨历时/min	2 630.0	45.0	734.5	892.4±144.8
		降雨量/mm	84.5	8.6	19.1	26.9±4.0
		$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	38.6	4.0	16.1	16.5±3.4
后峰型	6	降雨历时/min	1 760.0	255.0	765.0	910.8±233.6
		降雨量/mm	34.0	14.0	18.8	20.5±2.6
		$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	27.6	5.6	8.5	12.7±3.2

研究结果表明,前峰型降雨历时最小值为 75.0 min,最大值达 1 710.0 min,平均值为 710.1 min,持续时间差异显著。中峰型降雨历时最小值为 45.0 min,最大值为 2 630.0 min,平均值为 892.4 min,变动范围大,与前峰型相近但分布不同。后峰型降雨的降雨历时相对集中,平均时长 910.8 min,相对集中且整体长于前两者。

降雨量方面,前峰型最小值为 8.8 mm,最大值为 109.1 mm,平均 37.2 mm,分布分散,场次间变化明显。中峰型降雨量范围从 8.6 mm 至 84.5 mm,整体

平均降雨量低于前峰型,场次差异亦大。后峰型降雨量在 14.0~34.0 mm 之间,平均水平最低。

前峰型降雨的短历时波动剧烈, I_{30} 平均为 25.2 mm/h;中峰型降雨最小值为 4.0 mm/h,最大值为 38.6 mm/h,平均为 16.5 mm/h,短历时降雨强度平均水平略低且波动范围大;后峰型的短历时降雨强度平均水平低于前峰型和中峰型,且波动范围相对较小,整体强度相对较弱。

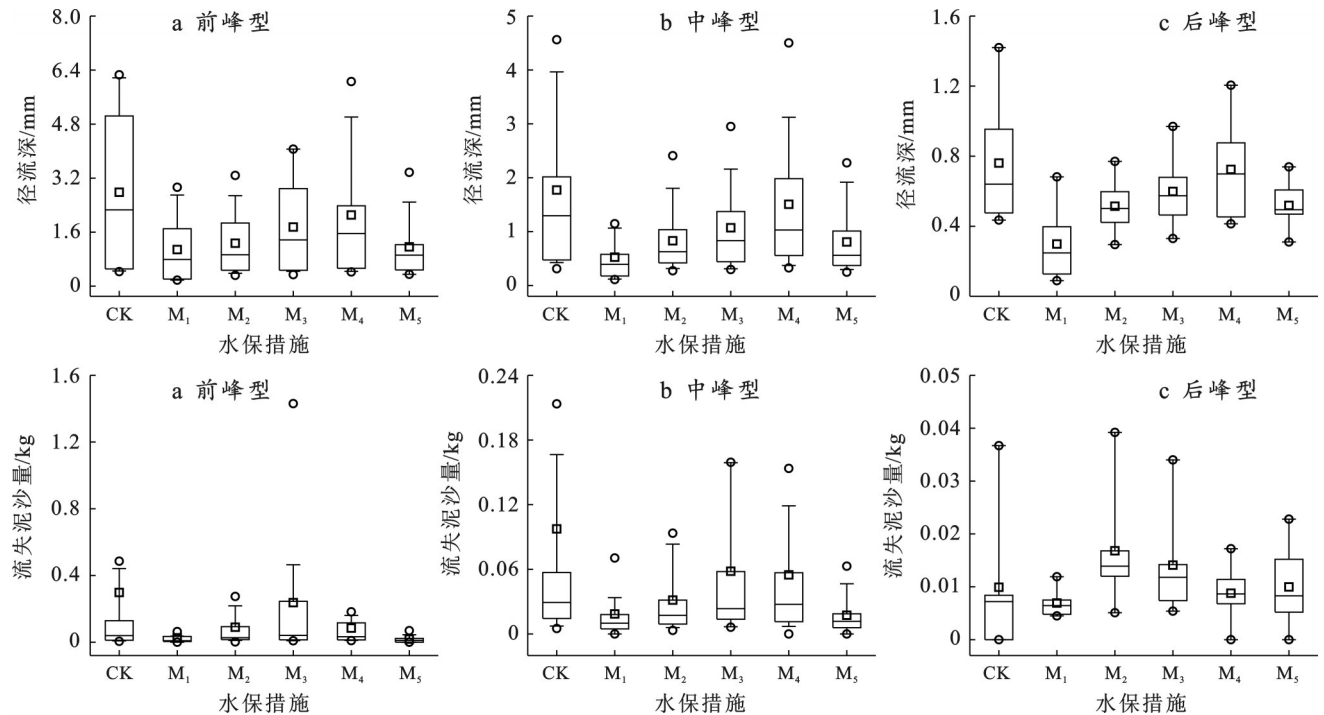
因此,红壤坡地不同雨型特征差异显著,前峰型降雨呈现短历时、大雨强和相对高频的特点;中峰型

降雨表现为中历时、中雨强和高频的特性；后峰型降雨则体现出中长历时、小雨强和低频的特征。

2.2 雨型和水土保持措施对径流、泥沙的影响

由图 2 及表 3 可知,不同雨型下各水土保持措施对径流深和泥沙流失量的影响差异显著。在前峰型雨型下,无措施对照(CK)径流深 2.78 mm,泥沙流失量 0.298 kg。植被措施(M₁)通过增强地表覆盖与入

渗,径流深降至 1.08 mm,削减幅度达 61.2%,泥沙流失量减至 0.026 kg,削减幅度高达 91.3%,控沙效果突出;顺坡间作(M₃)因垄向与坡向一致,泥沙流失量反升至 0.424 kg,高于 CK。梯田工程与植被结合措施(M₅)凭借地形改造与植被缓冲,径流深削减 58%至 1.17 mm,泥沙流失量仅 0.018 kg,综合效益仅次于 M₁。



注:图中箱体代表 75% 和 25% 的四分位数;须线代表 10%~90% 的范围;圆圈代表 5%~95% 的范围;实线代表中位数,方块代表均值。下同。

图 2 不同雨型各水土保持措施径流深及流失泥沙量

Fig.2 Runoff depth and sediment loss for each soil and water conservation measure for different rainfall patterns

中峰型雨型下,CK 径流深 1.77 mm、泥沙流失量 0.100 4 kg。M₁ 径流深削减 70.6%,泥沙流失量为 0.019 3 kg;M₅ 通过工程拦蓄与植被滞流,径流深削

减 54.2%,泥沙流失量 0.017 5 kg,削减幅度 82.6%。前峰型和 中峰型这两种雨型对 中强度集中降雨调控效果显著。

表 3 不同雨型各水土保持措施径流深及流失泥沙量平均值

Table 3 Average values of runoff depth and sediment loss from various soil and water conservation measures for different rainfall patterns

不同措施	前峰型		中峰型		后峰型	
	径流深/mm	流失泥沙量/kg	径流深/mm	流失泥沙量/kg	径流深/mm	流失泥沙量/kg
CK	2.78	0.298	1.77	0.100 4	0.76	0.009 9
植物措施(M ₁)	1.08	0.026	0.52	0.019 3	0.30	0.002 5
横坡间作(M ₂)	1.27	0.090	0.83	0.031 6	0.51	0.016 8
顺坡间作(M ₃)	1.75	0.424	1.07	0.059 6	0.60	0.014 1
梯田工程措施(M ₄)	2.11	0.084	1.51	0.057 1	0.72	0.007 2
梯田工程+植物措施(M ₅)	1.17	0.018	0.81	0.017 5	0.47	0.008 8

后峰型雨型下,CK 径流深 0.76 mm,泥沙流失量 0.009 9 kg。M₁ 仍表现最优,径流深削减 60.5%,泥沙流失量 0.002 5 kg,较 CK 低 74.7%;M₅ 通过梯田减缓流速与植被吸附泥沙,径流深削减 38.2%,泥沙流失

量 0.008 8 kg,削减幅度 11.1%,虽随雨强减弱削减幅度降低,但仍优于其他单一措施。

综上所述,植物措施(M₁)和梯田工程+植物措施(M₅)在不同雨型下对径流深和泥沙流失量的削减

效果优异,尤其在控制泥沙流失方面更为突出;M₃在前峰型雨型下效果较差,甚至加剧泥沙流失。

2.3 雨型和水土保持措施对氮磷流失的影响

图 3 展示了不同雨型各水土保持措施下总氮、总磷浓度的差异。结合表 4 可知,前峰型雨型中,CK 总氮浓度 1.052 mg/L,总磷 0.083 mg/L。M₁ 总氮含量

0.924 mg/L,较 CK 低 11.9%,总磷浓度较 CK 低 32.5%;M₅总氮含量 0.881 mg/L,较 CK 低 16.3%,总磷含量 0.053 mg/L,较 CK 低 36.1%。而横坡间作(M₂)总氮含量 1.132 mg/L,顺坡间作(M₃)总氮含量 1.214 mg/L且总磷含量 0.127 mg/L,均高于 CK,表明其氮磷流失加剧。

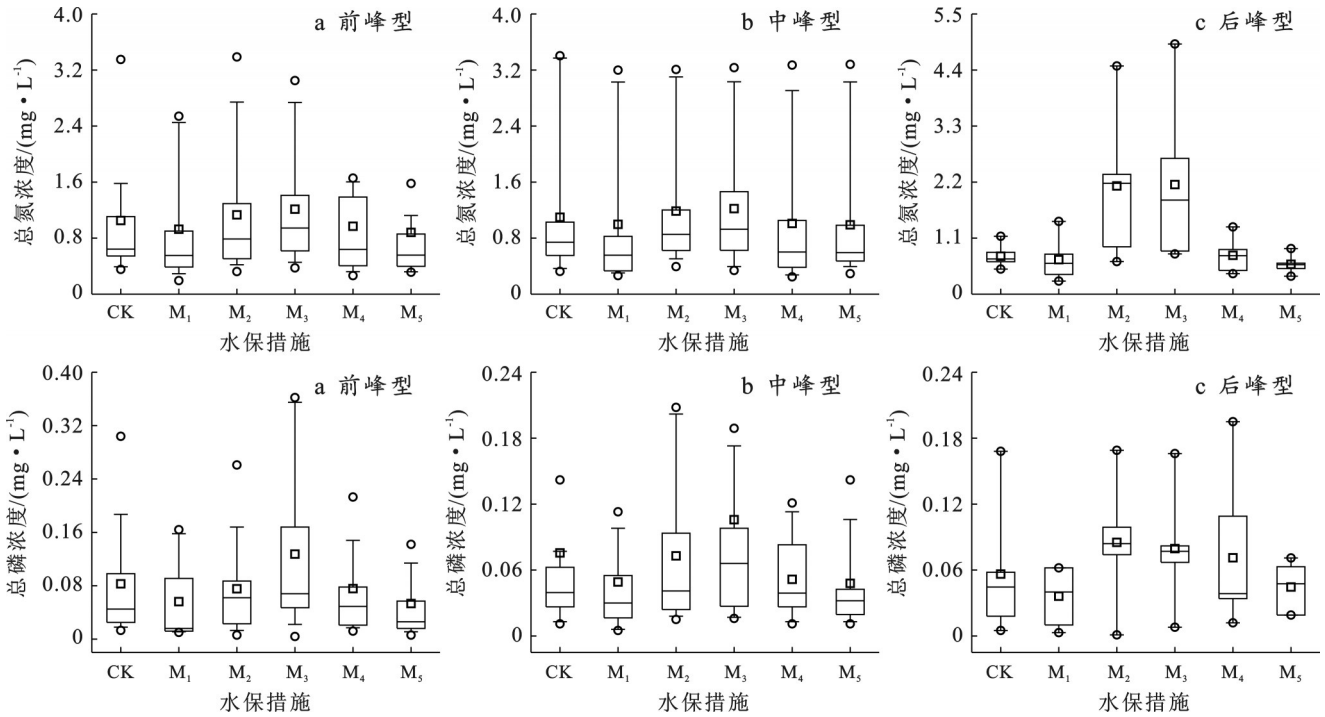


图 3 不同雨型各水土保持措施总氮及总磷浓度

Fig.3 Concentration of total nitrogen and total phosphorus in each soil and water conservation measure for different rainfall patterns

表 4 不同雨型各水土保持措施总氮及总磷浓度平均值

Table 4 Average values of runoff depth and sediment loss from various soil and water conservation measures for different rainfall patterns

不同措施	前峰型		中峰型		后峰型	
	总氮浓度/ (mg·L ⁻¹)	总磷浓度/ (mg·L ⁻¹)	总氮浓度/ (mg·L ⁻¹)	总磷浓度/ (mg·L ⁻¹)	总氮浓度/ (mg·L ⁻¹)	总磷浓度/ (mg·L ⁻¹)
CK	1.052	0.083	1.099	0.076	0.745	0.056
植物措施(M ₁)	0.927	0.056	0.997	0.049	0.678	0.033
横坡间作(M ₂)	1.132	0.075	1.185	0.073	2.215	0.083
顺坡间作(M ₃)	1.214	0.127	1.221	0.106	2.151	0.080
梯田工程措施(M ₄)	0.969	0.076	1.010	0.052	0.763	0.071
梯田工程措施+植物(M ₅)	0.881	0.053	0.990	0.048	0.586	0.044

中峰型雨型时,CK 总氮为 1.099 mg/L,总磷为 0.076 mg/L。M₁总氮为 0.997 mg/L,较 CK 低 9.3%,总磷 0.049 mg/L,较 CK 低 35.5%;M₅ 总氮 0.990 mg/L,较 CK 低 10.0%,总磷含量 0.048 mg/L,较 CK 低 36.8%。而 M₃ 总氮为 1.221 mg/L,总磷为 0.106 mg/L,仍高于 CK。后峰型雨型时,CK 总氮为 0.745 mg/L,总磷为 0.056 mg/L。M₁ 总氮为 0.678

mg/L,较 CK 低 8.9%,总磷为 0.033 mg/L,较 CK 低 41.1%;M₅总氮为 0.586 mg/L,较 CK 低 21.3%,总磷为 0.044 mg/L,较 CK 低 21.4%。表 4 表明,M₁和 M₅的总氮、总磷浓度较低,均值和中位线明显低于 CK,表明其对氮磷流失的控制效果突出。

整体而言,植物措施(M₁)和梯田工程+植物措施(M₅)对氮磷流失削减显著,尤其 M₁对总磷控制效

果更佳;横坡间作(M_2)、顺坡间作(M_3)在部分雨型下加剧氮磷流失,顺坡间作(M_3)总磷流失更严重;不同雨型中,后峰型下 M_1 对总磷减小最显著,前峰型下 M_5 对总氮流失削减较好。

3 讨论

3.1 雨型对径流泥沙和氮磷流失的影响

本研究分析了不同雨型的影响特征与红壤坡地径流泥沙与氮磷流失对其的响应特征。前峰型降雨(短历时、大雨强)作为主导雨型,其初期高强度降雨导致表层土壤空隙快速封闭,形成超渗产流主导模式^[21]。雨滴动能对土壤团聚体的物理击溅作用,结合红壤黏粒含量高、渗透率低的特性^[22],共同加剧了地表径流泥沙及氮磷流失。这与 Dunkerley D^[8] 提出的“雨强阈值效应”理论相符。中峰型降雨(中历时、中雨强)前期缓渗阶段(约占总历时 1/3),使土壤有一定入渗,中期雨强增大后土壤入渗能力下降,部分雨水转为径流,其径流量、泥沙及氮磷流失较前峰型略少。后峰型降雨(长历时、小雨强)因前期土壤水分饱和形成的蓄满产流机制^[23],使得总侵蚀量较低。研究量化了红壤区自然降雨过程对径流泥沙及氮磷流失的影响,弥补了人工模拟降雨试验的不足。

3.2 水土保持措施对径流泥沙和氮磷流失的影响

不同下垫面处理所形成的近地表微环境对产流产沙过程影响显著^[24]。植物措施(M_1)的高效性源于冠层截留、降低雨滴动能以及根系网络增强土壤抗剪强度^[25],使得径流流速降低。这种上层植被拦截雨水、中层根系加固土壤、下层地表阻滞径流的协同作用,使 M_1 在各雨型下径流削减率稳定在 52%~70.6%,显著优于单一工程措施。

需说明的是,各小区施肥量一致且均依当地常规量,对照区与措施处理小区无施肥差异,排除该因素对结果的干扰。梯田工程+植物措施(M_5)通过水平梯田将坡长有效切割,使径流动能衰减率提升;梯壁百喜草形成生物护坡层,减少坍塌风险;前埂后沟系统可截留泥沙,降低后续输沙能力^[12]。

顺坡间作(M_3)暴露其在生态效益方面的不足。本研究显示,顺坡间作虽与横坡间作(M_2)同属林一农型耕作措施,但因垄向与坡向平行^[26],导致雨季径流路径与坡长方向完全一致,显著加剧了地表径流的汇集与冲刷。

相较之下,横坡间作(M_2)因垄台垂直于坡向,可通过垄体形成地形阻碍,拦截部分径流并延长入渗时间^[15],然而,横坡间作在中峰型和后峰型雨型下的

径流泥沙氮磷浓度仍高于对照,反映出耕作措施对红壤养分流失的调控存在局限性——尽管垄作可减少泥沙迁移,但间作作物的频繁翻耕破坏了地表植被覆盖,反而增加了氮磷的暴露风险。

3.3 雨型与水土保持措施对径流泥沙、氮磷流失的影响

本研究揭示了红壤坡地雨型特征与水土保持措施效能的相互作用机制,凸显了植物措施(M_1)和梯田工程+植物措施(M_5)在不同雨型下的调控优势。

在前峰型雨型(短历时、大雨强)中,高强度降雨形成的强大雨滴动能迅速破坏红壤松散结构,导致孔隙堵塞,入渗率骤降,60%以上雨水转化为地表径流,成为产流产沙的主要诱因^[23]。数据显示,对照小区(CK)径流深达 2.78 mm,泥沙流失量 0.298 kg,而 M_1 通过植被冠层截留(减少雨滴击溅)和根系固土使径流深和泥沙流失量分别减小 61.2% 和 91.3%; M_5 借助梯田地形减缓流速、梯壁植草增强糙率的双重作用,显著降低了径流深和泥沙流失量。单一梯田工程(M_4)因缺乏植被覆盖,仅能拦截部分泥沙(0.084 kg),但径流调控效果弱(2.11 mm),凸显工程与植被措施协同的必要性。

氮磷流失与雨型密切相关,坡面氮磷流失与降雨量及雨强呈显著相关^[17]。前峰型雨强驱动下,红壤表层黏土颗粒随径流迁移。 M_1 的地表覆盖可促进土壤团粒结构形成,改善土壤入渗,减少氮素淋失及地表径流中的氮向土壤转移^[27],减少泥沙吸附态养分流失(总磷浓度减小 32.5%)。 M_5 通过减小坡地长度和陡度,降低流速,增加梯田导水率等截留养分(总氮浓度削减 16.3%)。中峰型雨型中, M_1 和 M_5 对氮磷的控制优势显著,总氮浓度分别降至 0.997, 0.990 mg/L,得益于植被根系吸收与土壤团粒结构对硝态氮的固持。后峰型雨型虽侵蚀动力较弱,但 M_1 凭借高植被覆盖率减少养分流失^[28]。

耕作措施(M_2, M_3)的失效本质是措施设计与雨型特征的错配。顺坡间作(M_3)因垄向与坡向平行,形成“径流加速通道”,前峰型雨型下泥沙流失量反超对照 42.3%;横坡间作(M_2)虽通过垄台拦截部分径流,但频繁耕作破坏地表结皮,中峰型雨型下总氮浓度(1.185 mg/L)仍高于对照,反映出单一耕作措施在红壤区的应用局限。研究结果为红壤区水土保持治理提供了依据,对解决该区域生态保护与农业生产协调发展的关键问题具有重要指导意义。

4 结论

(1) 红壤坡地雨型构成以短历时大雨强的前峰

型和中历时中雨强的中峰型为主,长历时小雨强的后峰型较少。

(2) 植物措施(M₁:三叶草、紫云英带状覆盖)对不同雨型下水土流失及氮磷流失效益最优,通过根系固土与植物截留的协同作用,实现径流削减60.5%、泥沙控制74.7%;而梯田工程+植物措施(M₅:前埂后沟+梯壁植草水平梯田)则通过地形改造与植被覆盖的工程-生物协同,在保持相同试验坡度条件下,径流控制率较M₁降低22.4%,但仍能同步削减9.9%总氮和21.4%总磷,且二者防控效果均显著优于单一措施。

(3) 水土保持措施效果与雨型特征密切相关。前峰型降雨时,M₁凭借植被冠层截留及根系固土抑制超渗产流,M₅依托梯田工程与梯壁植草达成工程拦蓄与植被缓冲协同控蚀;中峰型雨型中,M₁通过延长入渗,M₅借助地形滞流减少侵蚀;后峰型雨型下,M₁可拦截养分,M₅能稳定径流。研究明确了措施对雨型的响应差异,为红壤区水土流失治理提供了科学依据。

参考文献 (References)

- [1] 聂小飞,郑海金,涂安国,等.南方红壤区长期水土流失综合治理显著减少河流输沙:以鄱阳湖流域赣江上游平江为例[J].湖泊科学,2021,33(3):935-946.
Nie Xiaofei, Zheng Haijin, Tu Anguo, et al. Long-term soil and water conservation in red soil region of southern China significantly reduced riverine sediment load: A case study of Pingjiang River in the upper reaches of Ganjiang River, Lake Poyang basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 935-946.
- [2] Peng Tao, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. Catena, 2012, 90: 53-62.
- [3] de Almeida W S, Seitz S, de Oliveira L F C, et al. Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9 (1): 69-75.
- [4] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
Qin Wei, Zuo Changqing, Yan Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 124-132.
- [5] Liu Yaojun, Yang Jie, Hu Jianmin, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term *in situ* observation in the red soil region, Southern China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 457-467.
- [6] 王赫,杨舜成,岳晓峰,等.红壤区裸露坡地不同类型次降雨的产流产沙规律[J].水土保持学报,2023,37(4): 61-68.
Wang He, Yang Shuncheng, Yue Xiaofeng, et al. Runoff and sediment of different rainfall types on bare slope in the red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 61-68.
- [7] 殷水清,王杨,谢云,等.中国降雨过程时程分型特征[J].水科学进展,2014,25(5):617-624.
Yin Shuiqing, Wang Yang, Xie Yun, et al. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 617-624.
- [8] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: Rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [9] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47 (2):90-97.
Zheng Fenli, Bian Feng, Lu Jia, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 90-97.
- [10] 邬铃莉,王云琦,王晨洋,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33 (24):157-164.
Wu Lingli, Wang Yunqi, Wang Chenfeng, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of north China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (24): 157-164.
- [11] Luetzenburg G, Bittner M J, Calsamiglia A, et al. Climate and land use change effects on soil erosion in two small agricultural catchment systems Fugnitz-Austria, Can Revull-Spain [J]. Science of The Total Environment, 2020, 704: 135389.
- [12] 伍冰晨,陈晓安,汤崇军,等.红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施的响应[J].水利学报, 2024, 55(7): 802-814.
Wu Bingchen, Chen Xiaolan, Tang Chongjun, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(7): 802-814.
- [13] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018, 34(13): 160-169.
Wang Shuaibing, Song Yali, Wang Keqin, et al. Effects

- of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13):160-169.
- [14] 程鹏, 廖超林, 肖其亮, 等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(5):1036-1046.
Cheng Peng, Liao Chaolin, Xiao Qiliang, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5):1036-1046.
- [15] 郑海金, 左继超, 奚同行, 等. 红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5):1168-1178.
Zheng Haijin, Zuo Jichao, Xi Tonghang, et al. Nitrogen output through runoff on red soil slope and its composition [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5):1168-1178.
- [16] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(10):4178-4186.
Zuo Jichao, Zheng Haijin, Xi Tonghang, et al. Characteristics of phosphorus output through runoff on a red soil slope under natural rainfall conditions [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10):4178-4186.
- [17] 张梦, 李冬杰, 周玥. 雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1):85-90.
Zhang Meng, Li Dongjie, Zhou Yue. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion, nitrogen and potassium loss on loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):85-90.
- [18] Wang Wenting, Yin Shuiqing, Xie Yun, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall [J]. *Catena*, 2016, 141:56-65.
- [19] 涂安国, 谢颂华, 李英, 等. 长期野外监测红壤裸露坡地侵蚀性降雨分布及产沙分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7):129-135.
Tu Anguo, Xie Songhua, Li Ying, et al. Analysis of erosive rainfall distribution and sediment yield on long-term field monitoring sloping bare land of red soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7):129-135.
- [20] 水利部. 水文情报预报规范: GB/T 22482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Ministry of Water Resources. Standard for hydrological information and hydrological forecasting: GB/T 22482—2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [21] Huang Ping, Zhang Jiabao, Zhu Anning, et al. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 610:1020-1028.
- [22] 金鑫, 谢斯琴, 宋颖, 等. 人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):19-24.
Jin Xin, Xie Siqin, Song Ying, et al. Experimental study on the response of artificial red soil slope to the large rainfall intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):19-24.
- [23] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3):40-43.
Zhang Huiru, Zheng Fenli. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):40-43.
- [24] 段剑, 刘窑军, 汤崇军, 等. 不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J]. *水利学报*, 2017, 48(8):977-985.
Duan Jian, Liu Yaojun, Tang Chongjun, et al. Responses of subsurface flow characteristics to natural rainfall in red soil slopes of different surface covers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(8):977-985.
- [25] 张乐涛, 董俊武, 袁琳, 等. 黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15):101-109.
Zhang Letao, Dong Junwu, Yuan Lin, et al. Sediment-reducing benefits by runoff regulation under engineering measures in steep slope of abandoned soil deposits in Chinese loessial region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15):101-109.
- [26] 王小康, 谷举, 刘刚, 等. 横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀-沉积周期规律的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2):430-439.
Wang Xiaokang, Gu Ju, Liu Gang, et al. The influence of transverse and longitudinal ridge tillage on soil erosion and deposition cycles for mollisol slope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2):430-439.
- [27] 董贞凯, 穆兴民, 赵广举, 等. 延河流域侵蚀产沙对有效降雨量及植被恢复的响应[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(5):27-33.
Dong Zhenkai, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Response of sediment yield to effective rainfall and vegetation rehabilitation in the Yanhe River basin [J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(5):27-33.
- [28] Xia Lizhong, Hoermann G, Ma Li, et al. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges area, China [J]. *Catena*, 2013, 110:86-94.