

卢旺达共和国山地丘陵区土壤侵蚀调查报告

马波^{1,2}, 李朝栋^{1,2}, 王百群^{1,2}, Mupenzi Christophe³,
Nsanabaganwa Justin³, Hakorimana Egide³, 张加琼^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家

重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 基加利基督复临大学环境学院, 基加利 卢旺达)

摘要: [目的] 在卢旺达山地丘陵区开展土壤侵蚀调查, 分析该区土壤侵蚀特征及成因, 为尼罗河上游山地丘陵区土壤侵蚀预报和水土流失防治提供科学依据。[方法] 在卢旺达布设 4 条调查路线并选择调查点, 于 2019 年 10 月 17—22 日对调查点土壤侵蚀特征、成因及水土保持措施等进行了调查。[结果] 卢旺达多山地且以农牧业为主, 土壤侵蚀主要发生在坡耕地、损毁林地、建设用地等。坡耕地以片蚀和细沟侵蚀为主。损毁林地以片蚀和细沟侵蚀为主, 部分出现沟蚀; 当裸露地表形成草地或幼林后均较少发生土壤侵蚀。公路边坡、开挖边坡、土路路面及边坡等在降雨及径流的作用下产生沟蚀, 部分路段偶有崩陷侵蚀发生。梯田是该国最主要的水土保持措施, 具有较好的生态和经济效益。[结论] 卢旺达土壤侵蚀主要以水力侵蚀为主, 重力侵蚀次之。不合理的开垦坡地、毁林, 加之多山的地形, 导致侵蚀较为严重, 威胁当地的生态安全及粮食安全。该区缺乏水土流失监测资料, 需要重视水土保持基础理论研究, 加强水土流失基础数据的监测和采集, 同时需要加强其水土保持措施及土地管理工作, 保障卢旺达农业的可持续绿色发展。

关键词: 卢旺达共和国; 山地丘陵区; 土壤侵蚀; 陡坡耕地; 水土保持措施; 尼罗河上游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0281-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 马波, 李朝栋, 王百群, 等. 卢旺达共和国山地丘陵区土壤侵蚀调查报告[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 281-288. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.041; Ma Bo, Li Chaodong, Wang Baiqun, et al. Investigation report on soil erosion in mountain and hilly regions of Republic of Rwanda[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 281-288.

Investigation Report on Soil Erosion in Mountain and Hilly Regions of Republic of Rwanda

Ma Bo^{1,2}, Li Chaodong^{1,2}, Wang Baiqun^{1,2}, Mupenzi Christophe³,
Nsanabaganwa Justin³, Hakorimana Egide³, Zhang Jiaqiong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Faculty of Environmental Studies, University of Lay Adventists of Kigali, Kigali Rwanda)

Abstract: [Objective] The field investigation of soil erosion was carried out in mountain and hilly regions of the Republic of Rwanda to analyze the characteristics and reasons of soil erosion, in order to provide basis for soil erosion prediction and control in the mountainous and hilly areas of the upper reaches of the Nile River. [Methods] Four investigation routes were selected, soil erosion characteristics and reasons, and soil and water conservation measures were investigated from October 17 to 22, 2019 in Rwanda. [Results] The Republic of Rwanda is mountainous and dominated by agriculture and animal husbandry. Soil erosion mainly occurs in slope farmland, deforested land and construction land. Slope farmland is dominated by sheet erosion and ditch erosion.

收稿日期: 2019-11-29

修回日期: 2019-12-16

资助项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“尼罗河上游丘陵区水土保持与高产高效农业研究”(41561144011)

第一作者: 马波(1982—), 男(回族), 陕西省西乡县人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: soilcrop@163.com。

通讯作者: 张加琼(1984—), 女(藏族), 四川省小金县人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: jqzhang@nwfau.edu.cn。

Destroyed land is dominated by sheet erosion and gully erosion, and part of it appears gully erosion. When grass or young forest is formed on bare ground, soil erosion is less likely to occur. Gully erosion is caused by rainfall and runoff on roadside slope, excavated slopes and dirt road surface and slopes. Gravity erosion occasionally occurs on some roadside slopes. To prevent soil erosion, terrace is the most important soil and water conservation measure with significant ecological and economic benefits. [Conclusion] Soil erosion in Rwanda is dominated by water erosion, followed by gravity erosion. Unreasonable reclamation of sloping land, deforestation, and mountainous topography have caused severe soil erosion, and threatened food security as well as the safe ecology. Rwanda lacks monitoring data on soil and water loss at present. Thus, it is urgent and necessary to attach importance to the basic theoretical research of soil and water conservation, to strength the monitoring and collection of basic data of soil and water loss, to promote the implementation of soil and water conservation measures and land management, and to ensure the sustainable and green development of agriculture in Rwanda.

Keywords: the Republic of Rwanda; mountain and hilly region; soil erosion; steep slope farmland; soil and water conservation measures; upper reaches of the Nile

卢旺达共和国(the Republic of Rwanda,以下简称“卢旺达”)作为人口密集区山地农业系统典型区域,研究其土壤侵蚀环境及现状,对明确尼罗河上游山地丘陵区土壤侵蚀规律十分重要,对该区制定科学的土壤侵蚀防治对策具有重要的意义。卢旺达地处非洲高原西部、白尼罗河上游,是落后的农牧业国家,被联合国确定为世界最不发达国家之一^[1],然而其优越的自然条件为粮食、经济作物的生长提供了有利的条件,但由于人口众多、经济落后,粮食常年不能自给自足。随着卢旺达 2020 远景规划、中国“一带一路”倡议和联合国可持续发展目标等在该国的实施和推进,卢旺达不仅在经济上发展迅速,在生态环境保护和绿色可持续发展等方面也得到了高度关注;目前在河谷农业、土地退化、面源污染、保护性耕作等及农业可持续发展相关的领域开展了研究,但是在土壤侵蚀相关领域还相对匮乏^[2-6]。

据估计,卢旺达水土流失面积占国土陆地面积约 77%(2005 年),其水土流失风险较高的区域主要分布于西部山脉、北部的 Buberuka 高地、中部高原以及东部低地,且与当地的地形和降雨关系密切^[4,7-9]。目前有关卢旺达土壤侵蚀的研究侧重于区域土壤侵蚀风险评估,但是在小流域、坡面及田块尺度上鲜有相关研究成果报道。在田块或坡面尺度上,由于海拔、地形等因素的影响,不同地块的土壤侵蚀风险差异巨大,0~700 t/(hm²·a)不等^[10]。不合理的水土资源利用及传统粗放的农业耕作模式,使当地的土壤侵蚀难以得到有效控制,进而导致土地退化、水体污染等环境问题^[8,10-12]。前人^[4,5,8,10,14]采用 GIS 分析、遥感影像分析、模型模拟等方法开展了土地利用变化、农业耕作等对土壤侵蚀的影响研究^[13],分析了土壤侵蚀对养分迁移、土壤肥力下降等的影响,但是在土壤侵蚀过程与机理、土壤侵蚀防控等方面还没有系

统的研究成果。因而亟需应用新技术、新数据深入研究该区土壤侵蚀特征、驱动机制及时空分异规律,以阐明卢旺达土壤侵蚀过程及驱动机制。本文采用实地调查与 3S 技术相结合的方法,对卢旺达山地丘陵区开展土壤侵蚀调查,探寻该区土壤侵蚀特征及其存在的问题,为卢旺达乃至白尼罗上游山地丘陵区水土流失防治提供依据。

1 调查区概况^[15-19]

卢旺达共和国属东非内陆国家,位于赤道南侧的大湖区((1°—3°S, 28°—31°E),国土面积 26 338 km²,平均海拔 1 598 m,全国大部分区域属热带高原气候及热带草原气候,年均温 16~21℃,年均降水量 1 156 mm^[8]。卢旺达每年有 2 个雨季(3—5 月、10—11 月)和 2 个旱季(12—2 月、9—10 月),年内降雨分配极为不均。地形地貌主要以山地和高原为主,地势西高东低,素有“千丘之国”之称;海拔最低点为鲁西兹河(Rusizi River, 950 m),而最高点位于卡里辛比火山(Karisimbi Volcano),海拔达 4 519 m。卢旺达大部分地区属尼罗河流域,境内主要河流为尼亚巴隆哥河(Nyabarongo River),并最终汇入尼罗河上游支流卡盖拉河(Kagera River)。卢旺达曾经约 1/3 国土面积被森林所覆盖,但由于不断增加的人口压力,加之传统粗放农业耕作模式和砍伐树木获取生活燃料,导致大量森林遭到破坏,森林覆盖率曾一度下降至 2000 年的 8.9%^[20],目前森林面积约 6.20×10⁵ hm²,占全国面积 24%。卢旺达系联合国公布的世界最不发达国家之一,全国总人口 1 220 万(2017 年),主要集中于中部地区和西部基伍湖沿岸。经济以农牧业为主,农牧业用地约占国土面积 78.9%,从业人口约占劳动力总人口 84%,但粮食不能自给;2017 年农牧业占国内生产总值约 33.2%^[21]。耕地面积约为

1.20×10⁶ hm², 约占国土面积 45.6%, 由于该国人口稠密, 每个家庭平均耕地面积不足 0.6 hm²^[22], 人均耕地面积仅为 0.12 hm²。大部分耕地为坡耕地, 且坡度较陡。由于耕地的过度开垦, 导致了严重的水土流失, 而有限的国土面积也已难以承载不断增长的人口。当前, 卢旺达正面临着森林砍伐、过度放牧、土地退化、土壤侵蚀、土壤肥力下降、湿地退化、生物多样性丧失等一系列重大环境问题。

2 调查内容与方法

本次调查主要于 2019 年 10 月 17—22 日期间开展, 调查期正值卢旺达雨季, 有利于开展土壤侵蚀相关的调查工作。卢旺达国土面积较小, 且农牧业用地占比高达 78.9%, 土地利用类型较为单一, 因此本次调查选择沿卢旺达国家干道公路开展, 调查不同土地利用类型的水土流失现状。重点调查不同地区的坡耕地、人工林土壤侵蚀特征及其影响因素, 并调查水土保持措施种类及其效应。以首都基加利为原点, 分别沿 NR3、NR4 及 NR7 国家公路向卢旺达东北部尼亚卡塔莱(Nyagatare)、北部比温巴(Byumba)、西部鲁本盖拉(Rubengera)及西南部吉孔戈罗(Gikongoro)等方向布设 4 条调查路线, 在调查路线沿途以 30 km 左右的间距选择调查点, 调查土地利用类型、土壤侵蚀类型及特征、植被类型及盖度、坡耕地状况及作物种植情况、水土保持措施等内容。同时利用奥维地图对调查地类进行定位拍照, 为遥感解译标志的建立提供依据。此外, 记录地类的地理位置、海拔、坡度、坡向等信息。在卢旺达主要河流 Nyabarongo River 及其支流 Nyabugogo River 部分河段采集径流样品, 每个断面采集 3 个重复样品, 利用称重法测量其含沙量。调查期间的日降雨量采用 TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis Data 3B42 降雨资料进行估算。基于以上调查工作, 结合 2017 年 8 月 26 日至 9 月 3 日卢旺达旱季综合调查结果, 对该区土壤侵蚀特征、成因等进行系统分析。

3 土壤侵蚀特征

3.1 耕地土壤侵蚀

卢旺达全境多高山丘陵, 因此坡耕地是其主要的耕地形式。通过对卢旺达坡耕地调查可知, 坡耕地是该区水土流失的重要来源之一。根据 2017 年全球 30 m 分辨率土地覆盖数据集(Global Land Cover)及 30 m 分辨率 SRTM DEM 分析可知, 该区坡度≤5°缓坡耕地面积占比约 36%, 坡度介于 5°~25°的坡耕地面积占比约 62%(表 1)。在雨季临近时, 当地农民

需要对土地进行翻耕, 植被覆盖度相对较低, 部分地块甚至呈裸露状态(附图 9a)。加之雨季多短历时阵性降雨, 从而导致坡耕地极易产生土壤侵蚀。而当作物植株进入生长旺盛期后, 便能对地表产生一定的保护作用, 从而减少水土流失。在旱季时节, 由于高温干旱少雨的气候特点, 坡耕地基本无法种植作物, 坡面也呈裸露状态(附图 9b), 在局地会产生轻微的风蚀, 水蚀较少发生。考察期间大部分作物正处于幼苗期, 坡耕地覆盖度依然较低; 加之当地降雨量较大, 坡耕地种植需考虑排水, 因此多为顺坡耕种, 这为土壤侵蚀的产生提供了便利条件。调查发现, 坡耕地土壤侵蚀主要表现为片蚀和细沟侵蚀, 且普遍分布于没有水土保持措施的坡耕地上(图 1)。地势较为平缓的耕地主要分布于河谷地带, 由于河谷内水肥条件较好, 旱季、雨季均能得到较好利用, 目前多种植水稻、蔬菜和菌草等(附图 9c)。

表 1 卢旺达坡耕地坡度特征

坡度/(°)	比例/%
≤5	35.62
6~10	32.49
11~15	16.44
16~20	8.53
21~25	4.46
>25	2.46

注: 根据 2017 年全球 30 m 分辨率土地覆盖数据集(global land cover)及 30 m 分辨率 SRTM DEM 提取。



图 1 坡耕地土壤侵蚀(马波摄于 20191021)

3.2 道路侵蚀

在调查沿线, 仅在首都基加利及其周边部分公路具有边坡防护工程, 全国主要公路均缺乏有效的边坡防护措施。由于缺乏必要的护坡工程, 雨季时边坡的侵蚀非常严重, 部分高陡边坡还极易发生滑坡、崩塌等重力侵蚀。道路山体一侧裸露边坡普遍存在沟蚀

和片蚀,而边坡上方的径流流经边坡时则会产生强烈的下切和侧蚀,在坡面上留下较深的侵蚀沟(图 2)。与此同时,径流在坡面汇集,并在边坡底部上方形成跌坎,从而加剧的沟蚀和重力侵蚀。道路外侧下方边坡也由于路面积水的作用产生严重的侵蚀。虽然部分路段设有排水沟,但是排水沟排水处下方缺少消能池或其他辅助配套设施,导致排水口下方往往形成较



图 2 道路边坡侵蚀状况(马波摄于 20191018)

卢旺达全境除国家干道公路为硬化公路以外均为土质路面。降雨过程中,坡耕地、林地等产生的径流多汇聚于路面并向下运移,在路面上形成明显的侵蚀沟(图 4)。



图 4 道路侵蚀(马波摄于 20170828)

3.3 工程建设产生的侵蚀

卢旺达近年来经济发展较快,是非洲经济发展最为迅速的国家之一,因此随处可见公路、厂房、民房等大型工程的施工场所。使施工区及其周边的地形地貌、表土结构、植被覆盖等均发生变化,且同时产生规模较大的开挖面;但相较于中国完备的开发建设项目水土保持方案管理制度,卢旺达各类型工程建设项目极少考虑水土保持措施配置,建设过程中的临时水土

大的跌坎,下泄的径流在地形作用下于山体上形成切沟,侵蚀剧烈。在某些高陡边坡路段,易产生滑坡,崩塌等重力侵蚀(图 3)。这在多短历时阵性降雨的雨季出现的概率较大,尤其是在乡村道路上最为常见。有研究表明,卢旺达 42.3%的区域均较易发生滑坡,尤其是在西部山脉区和南部、北部等高山区^[23]。因此,需要对这些地区发生滑坡的潜在威胁予以足够重视。



图 3 道路边坡滑坡(马波摄于 20191021)

由图 5 可以看出,主路往往连接有许多山间小道,这恰恰形成了径流的输移通道,主路上形成的径流会沿小道向山下运动,更易催生切沟的形成,导致更为严重的侵蚀。



图 5 路面汇流造成的侵蚀(马波摄于 20191018)

保持措施也无从谈起。施工期间如遇暴雨,稀疏的植被和扰动的地表会导致严重的土壤侵蚀,而诸如取土弃土场、施工作业区、施工临时区等人为扰动较严重的区域则会产生明显的沟蚀(图 6,附图 9d)。实测降雨过程中工地内自然形成的侵蚀沟径流含沙量为 133.54 g/L(图 7),而施工区旁的排水沟由于工程堆土垮塌进入水道,排水沟内含沙量更是高达 164.70 g/L。



图 6 工程建设引起的土壤侵蚀(马波摄于 20191018)



图 7 道路边坡侵蚀(李朝栋摄于 20191017)

3.4 桉树林土壤侵蚀

卢旺达的原始森林目前主要分布于北部卢旺达火山公园(Volcanos National Park)和西南部的纽恩威国家公园(Nyungwe National Park),此外全境范围内斑块状分布有以桉树为主的人工林。常年未受扰动的桉树林,其林下枯落物和草本植物较为丰富,可在一定程度上起到防止水土流失的作用(附图 9e),但依然存在斑块状侵蚀痕迹,在坡度较陡的区域还会产生较深的侵蚀沟,沟道平均深度达 50 cm,最深处可达 70 cm 以上(图 8)。经计算可知,调查当日采样点附近平均降雨量为 33.4 mm,最大可达 76.6 mm;在降雨过程中林下灌草层可显著减少坡面径流含沙量,而林下侵蚀沟内径流含沙量显著高于前者,经

观测径流含沙量可知林下侵蚀沟径流含沙量高达 133.04 g/L,而经草地下泄的径流样未观测到泥沙(图 9—10)。桉树是当地居民重要的生活燃料和经济来源,当桉树生长至一定阶段便会被砍伐,使整片山林成为采伐迹地,以待其继续萌发枝条。由于缺乏有效的覆被,在砍伐后 1~2 a 内极易产生土壤侵蚀。而砍伐后的森林又有利于草本植物生长,待草地形成以后又会防止侵蚀的产生(附图 9f,附图 9g)。如此周而复始,桉树林不仅产生着经济效益,同时也深刻影响着林地土壤侵蚀过程。目前,卢旺达毁林依然严重,森林面积较大的西部省及北部省毁林面积曾一度达到 1 896 和 1 668 hm^2 ,不仅降低了生物多样性,还导致了严重的水土流失^[24]。



图 8 桉树林侵蚀沟(马波摄于 20191021)



图 9 桉树林下草地坡面径流(马波摄于 20191018)

3.5 河流泥沙

对 Nyabarongo 和 Nyabugogo 流域及其支流 12 个点的径流量进行采集,采样点的基本信息及含沙量观测结果详见表 2。Nyaborongo 是卢旺达境内最长的河流,属卡盖拉河(Kagera River)的上游,也是白尼罗河(White Nile River)的源头之一。而 Nyabugogo

河是 Nyabarongo 河最重要的支流,流域面积 1 647 km^2 ,流域内农业用地占比 54%^[11]。

由表 2 中可知,除 Nyabugogo 上游水库采样点以外,采样点平均瞬时含沙量可达 129.94 kg/m^3 ,Nyabarongo 上游干流平均瞬时含沙量为 131.28 kg/m^3 ,Nyabugogo 干流平均瞬时含沙量为 129.40 kg/m^3 ,

Nyabugogo 其他支流平均瞬时含沙量为 129.85 kg/m^3 。Nyabugogo 上游修建有水库,加之库区两岸有防护林和湿地,故水库下泄的径流水质清澈,未观测到含沙量。

因此,Nyabugogo 流域上游泥沙主要来自于其支流 Muyanza 和 Mwange 的高含沙径流。由于 Nyabugogo 上游清澈径流的汇入,使下游干流的含沙量略低于上游支流。Nyabarongo 径流采样点均位于卢旺达西部,瞬时含沙量普遍较高。

基于以上分析可知,目前卢旺达水土流失严重,导致河流泥沙含量较高;剧烈的水土流失是该国河流泥沙含量高的根本原因。



图 10 桉树林下侵蚀沟径流(马波摄于 20191018)

表 2 卢旺达主要河流含沙量观测结果

河流名称	观测点	观测时间	日降水量/mm	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Mwange River	Muyanza 支流	20191020	25.2	129.46
Muyanza River	Nyabugogo 上游支流	20191020	25.2	129.17
Rwigine River	Nyabugogo 支流 Rwigine 流域出口处	20191017	54.0	130.42
Nyabugogo 支流	Nyacyonga 镇以北	20191020	25.2	131.23
Yanzi River	基加利西北郊 Nyabugogo 支流	20191020	28.9	128.95
Nyabugogo River	Nyabugogo 上游水库泄水处	20191020	76.3	0
Nyabugogo River	Muyanza 与 Nyabugogo 交汇处下游	20191020	25.2	129.51
Nyabugogo River	Shango 村西北方向干流	20191020	25.2	129.38
Nyabugogo River	Nyacyonga 镇以东干流	20191020	25.2	129.49
Nyabugogo River	基加利以西 Nyabugogo 流域出口处	20191020	32.6	129.23
Nyabarongo River	基加利以西与 Nyabugogo 两河交汇处下游	20191020	32.6	130.44
Nyabarongo River	Muhororo 镇以东上游干流	20191021	0	130.15
Nyabarongo River	Nyabarongo 上游水库库尾	20191021	0	132.40

4 水土流失治理措施

调查显示,卢旺达土壤侵蚀形势较为严峻,但土壤侵蚀治理措施却相对单一。目前,该国最主要的水土保持措施为梯田。当地依据地势修筑的梯田主要有水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田和复式梯田等。在坡度较陡的坡耕地上,当地推广一种陡坡梯田(radical terrace),可实现大于 26.5° 的坡面上进行梯田作业,且在全国广泛采用(图 11)。这种梯田形式类似于隔坡梯田与反坡梯田的结合体,田面水平或略向内倾斜,种植香蕉、木薯、豆类等作物,坡面长度小于 2 m ,其上种植草灌,以达到蓄水、保土、保肥的目的,同时起到防止陡坡水土流失的作用。尽管依据地形条件,梯田的形式各有不同,但均能发挥较好的水土保持效益。研究表明,该区的梯田可使粮食产量平均增加 25% ,土壤有机质含量也可提高至自然生态系统一半的水平^[25-26],这对当地的农业发展和粮食安全有着至关重要的作用。香蕉是当地重要的粮食来源之一,在全国大面积种植;因此结合香蕉的种植特点,其主要

防治措施为园地地表秸秆覆盖,以期达到减少水土流失的同时提高土壤养分的目的。在没有梯田等措施的坡耕地上,会采用种植植物篱的方法,将长坡隔断为短坡。部分植物篱同时在其下坡位设置简易排水沟,以提高防止水土流失的效果。卢旺达政府自 2006 年于中国引入菌草,在当地主要用于栽培食(药)用菌,并在中国援卢旺达农业技术示范中心进行试验示范。胡应平等通过观测发现,相对于传统栽培模式,“等高线种植巨菌草”及“等高线种植菌草绿篱+梯田套种”,分别将土壤侵蚀量降低了 96.3% 和 90.4% ^[18]。将菌草种植与梯田、绿篱、间种套种等水土保持措施相结合,可有效提高单一水土保持的防治效果,同时也说明菌草种植在防治当地水土流失、提高经济收入等方面具有较好的应用前景。然而在调查中发现,当地菌草多种植于河谷平坦地带及缓坡的坡角处,由于这些区域具有较好的水肥条件,更利于菌草的生长,但是并没有过多考虑菌草的水土保持效益。此外,菌草还零星种植于少部分梯田的地埂上用于保护梯田,防止水土流失。



图 11 陡坡梯田(radical terrace,马波摄于 20191021)

5 土壤侵蚀影响因素分析

卢旺达境内多山的地形特点,以农牧用地为主的利用方式,是该区土壤侵蚀发生的客观因素。然而其剧烈的人类活动是造成当地土壤侵蚀严重的最主要原因。卢旺达国土面积相对较小,但人口众多,是世界上人口密度最大的国家之一。为满足人口增加带来的日益增长的粮食需求,毁林开垦耕地、过度放牧,加之传统粗放的农牧业模式,加剧了土壤侵蚀的发生,进而造成土壤肥力下降,对粮食生产也会带来威胁。卢旺达近年来经济发展较快,国内基础设施建设力度加大,居民区面积相继不断扩大。因此,工程建设所致的剧烈人为扰动是导致某些区域土壤侵蚀激增的重要原因。当地政府对水土流失的防治颇为重视,但是由于经济发展较为落后,在水土保持措施方面的投入相对较少。此外,全球气候变化对东非产生了深远的影响,卢旺达雨季极端降雨显著增加,是造成目前土壤侵蚀形势严峻的重要原因之一。

6 讨论与建议

6.1 加强水土保持理论研究

卢旺达严重的土壤侵蚀不仅造成土地退化、河流泥沙含量增加,也威胁着粮食安全、生态安全。随着人口的增加和经济的发展,当地民众对水土流失的危害有了认识,社会各界越来越重视土壤侵蚀的危害,卢旺达政府开展了相关水土保持工作,并采取了修筑梯田、限制毁林、植树造林、森林保育等相关措施,以期提高森林覆盖率、减少水土流失。但是目前水土保持基础研究尚且薄弱,在土壤侵蚀过程与机理、土壤侵蚀模型模拟与预测、土壤侵蚀环境演变、流域生态与管理、水土保持环境效应、水土保持规划等方面存在空白或不足。因此,在现有的研究基础上,需要加

强水土保持理论研究,开展土壤侵蚀、水土保持措施、水土保持规划等方面的基础研究,特别是针对高强度开发下的坡耕地土壤侵蚀研究,针对滑坡、泥石流等重大灾害的防治措施研究,以期制定系统的水土保持措施技术体系。

6.2 加强水土保持监测

目前,卢旺达土壤侵蚀监测与调查数据、流域水文监测数据均极为匮乏,缺乏开展土壤侵蚀与水土保持研究的相关基础,也不利于准确把握该国的土壤侵蚀现状。现有的土壤侵蚀监测及研究成果不足以支撑水土保持综合防治措施技术体系的建立,尚不能满足卢旺达水土保持与可持续生态农业发展的需求。调查显示,卢旺达主要河流、重点流域的径流含沙量较大,但是目前还没有开展相关监测,主要的水文站点目前侧重于水位、气象要素等日常观测,无法支撑区域土壤侵蚀评价、流域水沙情势、水土保持规划等方面的研究。在坡面尺度上也很少开展相关的试验或观测,目前仅在中国援卢旺达农业技术示范中心由福建农林大学开展了部分径流小区上的土壤侵蚀观测(附图 9h)。因此需要加强在不同土地利用类型上的土壤侵蚀过程观测,重点加强过度放牧地、坡耕地、损毁林地的土壤侵蚀过程的试验观测,以期有效地开展水土保持工作。

6.3 关注气候变化与人口压力对水土流失的显著影响

随着全球气候变化,卢旺达平均气温呈升高趋势、降雨呈下降趋势,预测将导致粮食显著减产;而随着该区人口激增,人地矛盾、人畜矛盾将进一步加剧。调查显示,卢旺达雨季的极端降雨频率显著增加,这对坡耕地土壤侵蚀、滑坡、泥石流的发生均产生了较大的促进作用。卢旺达是传统的雨养农业模式,对气候变化较为敏感;旱季时间的延长则压缩了农业耕作、作物生长的时间,更不利于粮食生产。根据 Knomma 的报道,进入 21 世纪以来,卢旺达人口密度呈急剧上升趋势,由 2000 年的 321.6 人/km^2 增加至 2018 年的 498.7 人/km^2 ,对当地粮食、水、土地资源的需求相应成倍增长。水土流失导致的土地退化是当地粮食生产的头号环境问题,气候变化对当地水土流失产生了不利影响。因此,为防止生态环境进一步恶化,加强水土保持工作势在必行。

[参 考 文 献]

- [1] Unidos N. Handbook on the least developed country category: inclusion, graduation and special support measures[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2008, 235(1):147-164.
- [2] Uwizeyimana D, Mureithi S M, Mvuyekure S M, et al.

- Modelling surface runoff using the soil conservation service-curve number method in a drought prone agro-ecological zone in Rwanda[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019,7(1):9-17.
- [3] Rizinjirabake F, Tenenbaum D E, Pilesjö P. Sources of soil dissolved organic carbon in a mixed agricultural and forested watershed in Rwanda[J]. *Catena*, 2019,181: 104085.
- [4] Rutebuka J, Kagabo D M, Verdoodt A. Farmers' diagnosis of current soil erosion status and control within two contrasting agro-ecological zones of Rwanda[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 278: 81-95.
- [5] Nzeyimana I, Hartemink A E, Ritsema C, et al. Mulching as a strategy to improve soil properties and reduce soil erodibility in coffee farming systems of Rwanda[J]. *Catena*, 2017,149:43-51.
- [6] Mbonigaba J, Culot M. Reclamation of an acidic soil of Rwanda's central upland by composts based on natural vegetation biomass[J]. *Rwanda Journal*, 2009,17(1): 64-81.
- [7] Bizoza A R. Three-stage analysis of the adoption of soil and water conservation in the highlands of Rwanda[J]. *Land Degradation & Development*, 2014, 25(4): 360-372.
- [8] Karamage F, Zhang C, Ndayisaba F, et al. Extent of cropland and related soil erosion risk in Rwanda[J]. *Sustainability*, 2016,8:609.
- [9] Clay D, DeJaegher Y. Agro-ecological zones: The development of a regional classification scheme for Rwanda[J]. *Tropicultura*, 1987,5(4):153-159.
- [10] Roose E, Ndayizigiye F. Agroforestry, water and soil fertility management to fight erosion in tropical mountains of Rwanda[J]. *Soil Technology*, 1997,11(1):109-119.
- [11] Uwamahoro D. 卢旺达 Nyabugogo 流域的水质评估及其对综合管理的启示[D]. 福建 厦门:厦门大学,2014.
- [12] Kagabo M D. Participatory Integrated Watershed Management in the North-Western Highlands of Rwanda [D]. Holland: Wageningen University, 2013.
- [13] Karamage F, Zhang C, Kayiranga A, et al. USLE-based assessment of soil erosion by water in the Nyaburongo River catchment, Rwanda [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016,13(8):835.
- [14] Nhapi I. Assessment of water pollution levels in the Nyabugogo catchment, Rwanda[J]. *The Open Environmental Engineering Journal*, 2011,4:40-53.
- [15] Wikipedia. Rwanda[EB/OL]. (2016-06-23)[2019-06-06]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Rwanda>.
- [16] Clay D, Lemarchand R. Rwanda[EB/OL]. (2016-06-23)[2019-06-06]. <https://www.britannica.com/place/Rwanda>.
- [17] 外交部. 卢旺达国家概况[EB/OL]. (2016-06-23)[2019-06-06]. https://www.fmprc.gov.cn/web/gjhdq_676201/gj_676203/fz_677316/1206_678068/1206_x0_678070/.
- [18] 胡应平,林占森,林冬梅,等. 卢旺达高原坡地水土流失的研究与对策[J]. *西南农业学报*, 2019,32(2):389-394.
- [19] The World Bank In Rwanda-Overview[EB/OL]. (2016-06-23)[2019-06-06]. <https://www.worldbank.org/en/country/rwanda/overview>.
- [20] Habiaremye G, Ge J W, De La J, et al. Demographic pressure impacts on forests in Rwanda[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011,6(19):4533-4538.
- [21] NISR. National Institute of Statistics of Rwanda(NISR). Statistical Yearbook[R]. NISR, 2016.
- [22] NISR. National Institute of Statistics of Rwanda(NISR). Statistical Yearbook[R]. NISR, 2015.
- [23] Dolean B. Landslide susceptibility assessment using spatial analysis and GIS modeling in Cluj-Napoca Metropolitan Area, Romania[J]. *Cinq Continents*, 2017, 15:23-41.
- [24] Jean De La Paix Mupenzi. 卢旺达农业产业化对环境的影响、污染物控制和环境保护政策与评价[D]. 北京:中国地质大学,2010.
- [25] White J. Terracing practice increases food security and mitigates climate change in East Africa [EB/OL]. (2016-06-23)[2019-06-06]. <https://ccafs.cgiar.org/blog/terracing-practice-increases-food-security-and-mitigates-climate-change-east-africa> #. XdXzIrCONMB.
- [26] Saiz G, Wandera F M, Pelster D E, et al. Long-term assessment of soil and water conservation measures (Fanya-juu terraces) on soil organic matter in South Eastern Kenya[J]. *Geoderma*, 2016,274:1-9.



a 雨季坡耕地(马波摄于20191021, 第283页)



b 旱季坡耕地(马波摄于20170827, 第283页)



c 河谷农耕地(李朝栋摄于20191018, 第283页)



d 建设工程取土场侵蚀状况
(马波摄于20191018, 第284页)



e 桉树林下植被状况(李朝栋摄于20191021, 第285页)



f 毁林后形成的草地(李朝栋摄于20191017, 第285页)



g 毁林后形成的幼林(马波摄于20191020, 第285页)



h 中国援卢旺达农业技术示范中心径流
小区(马波摄于20170830, 第287页)

附图9 卢旺达共和国山地丘陵区土壤侵蚀状况