

引用格式: 阚欣玥, 张洪. 低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀的影响[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 25-37

KAN Xinyue, ZHANG Hong. Influence of land construction and development on soil and water loss in low hill slope [J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 25-37

低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀的影响

阚欣玥, 张洪*

(云南财经大学 城市与环境学院, 昆明 650000)

摘要: 低丘缓坡建设开发是否导致水土流失以及多大程度的水土流失, 是学术界一直争论的问题。本文以最早在全省开展低丘缓坡建设开发的云南省为例, 选择具有代表性的滇中地区 62 个低丘缓坡建设开发项目区为研究对象, 结合对项目区进行实地踏勘, 采用修正的通用土壤侵蚀方程 (Revised Universal Soil Erosion Equation, RUSLE), 对滇中地区低丘缓坡项目区 2010 年和 2018 年 (即建设开发前后) 土壤侵蚀状况及其时空变化特征进行定量分析, 探讨低丘缓坡建设开发所造成的地形、土地利用类型及植被覆盖率的变化对土壤侵蚀的影响。结果表明: (1) 整体上滇中地区 62 个项目区在开发后土壤侵蚀状况趋向好转, 具体表现为微度侵蚀等级面积净增加; (2) 低覆盖草地、灌木以及 $\geq 15^\circ$ 坡耕地, 水土保持能力较弱。其中, 草地和灌木的水土流失面积较大, 占总水土流失面积达 76.57%; (3) 水土流失高发区主要集中在坡度 $\geq 8^\circ$ 的区域, 若仅考虑引起水土流失面积大小, $8^\circ \sim 25^\circ$ 区域内的水土流失情况最为严重, 占总水土流失面积 68.54%; 而从引起水土流失难易程度上, 坡度 $\geq 25^\circ$ 发生水土流失的概率最高, 平均水土流失面积占该坡度面积 62.05%。综上, 本文揭示低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀的影响, 为项目区水土流失防治和危害评估提供数据支撑, 并为区域生态修复和综合治理提供参考和依据。

关键词: 低丘缓坡; 建设开发; 土壤侵蚀; RUSLE 方程; 滇中地区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

土壤侵蚀对区域内生态安全具有负向效应, 如导致土壤肥力下降, 引起土质恶化, 严重则会引发泥石流和山洪等自然灾害。对土壤侵蚀状况进行评估和测算, 并根据分析结果采取相应的生物和物理防护措施是有效缓解区域土壤侵蚀的重要途径^[1-2]。1954 年美国农业部联合印第安纳州普渡大学对土壤侵蚀的机理和成因进行深入研究, 1961 年 WISCHMEIER W H 和 SMITH D D 提出通用土壤侵蚀方程 (Universal Soil Erosion Equation, USLE)^[3], 该模型应用广泛, 具有较强的普适性, 在土壤流失量的测算方面做出重大贡献^[4-6]。在后期的研究中,

发现此模型仍存在不足和局限, 于 1975 年至 1980 年间, 美国农业部根据细沟间侵蚀和细沟侵蚀的原理及泥沙输移的动力机制建立修正的通用土壤侵蚀方程 (Revised Universal Soil Erosion Equation, RUSLE), 并在 1992 年末首次提出此方程^[4-6], 引起国内外学者的广泛关注。此模型能较好地预测由于降水产生地表径流所引起的水力侵蚀, 并考虑管理措施对土壤侵蚀的影响, 具有较强的灵活性, 以至于该模型在当时乃至现在都是土壤侵蚀研究中十分重要的基础模型^[5-6]。

目前, RUSLE 方程已广泛应用于不同区域, 且

收稿日期 (Received date): 2020-04-03; 改回日期 (Accepted date): 2021-1-31

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (71764034)。[National Natural Science Foundation of China (71764034)]

作者简介 (Biography): 阚欣玥 (1994-), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土地规划利用。[KAN Xinyue (1994-), female, born in Tangshan, Hebei province, M. Sc. candidate, research on land use planning] E-mail: 1396640059@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 张洪 (1958-), 男, 四川成都人, 教授, 主要研究方向: 城市发展与土地利用研究。[ZHANG Hong (1958-), male, born in Chengdu, Sichuan province, professor, research on city development and land use] E-mail: zhanghong0957@126.com

越来越多的学者借助 RS 和 GIS 技术结合 RUSLE 方程,利用多源数据探究行政区等大尺度区域土壤侵蚀规律及空间分布特征^[7-13]。这是由于以行政区作为研究单元,在数据上可获取性高且有利于决策者针对不同行政区的土壤侵蚀问题制定针对性政策,以获得相应的财政支撑。但土壤侵蚀和水土流失在空间上具有一定的流动性,其不完全受行政区的限制,因此需重视特定区域小尺度的土壤侵蚀的研究。而在低丘缓坡山地开发过程中,原有的下垫面性质遭到破坏,导致坡度改变、植被覆盖率和生物多样性降低等问题,从而可能增加项目区的行洪压力,威胁项目区的生态系统稳定^[1]。但限于低丘缓坡项目区面积较小、空间分布较为分散以及高精度数据的难以获取的情况,导致研究成本较高,所以鲜有以低丘缓坡项目区为研究对象,研究建设开发对土壤侵蚀的影响。而事实上,低丘缓坡项目区作为人类活动密集和地表干扰强烈的区域单元,是研究人为扰动对土壤侵蚀影响极佳的实验样本,因此具有较高的研究价值。

云南省是最早在全省范围内开展低丘缓坡开发试点的省份。其中,滇中地区自然资源优裕,具备丰富的山地资源,低丘缓坡项目区数量占云南省总量的 60% 以上,并且滇中地区内降水、气温等气候条件较为均一,能有效避免气候差异对土壤侵蚀的干扰,从而为研究开发建设是否会加剧低丘缓坡区域土壤侵蚀这一热点问题,提供了较为丰富的数据样本。而修正的通用土壤侵蚀方程(RUSLE)与第一代土壤侵蚀方程(USLE)相比,考虑了地形与气候条件的交互作用,反映地貌景观的空间分异特征,结果的可靠性得到提升^[4]。虽 RUSLE 方程仍存在部分缺陷,但其是目前较为系统和实用性强的预测土壤侵蚀状况的方程^[3]。因此,本文选取具有代表性的滇中地区(昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄州)中已经开发建设的低丘缓坡项目区,通过到项目区现场踏勘和测度,运用遥感和 GIS 技术等手段,利用修正的通用土壤侵蚀方程(RUSLE),对项目区 2010 年和 2018 年(即开发前后)的土壤侵蚀状况进行评估,探讨土壤侵蚀的时空变化特征以及地形因子、土地利用类型及植被覆盖率与土壤侵蚀之间的内在关系,探究项目区建设开发采取的水土保持措施对抑制或缓解项目区的土壤侵蚀的成效,从而为研究区水土

流失防治和构建土壤侵蚀敏感性和危害评估模型提供数据支撑,为区域生态修复和综合治理提供参考和依据^[1,8]。

1 材料方法

1.1 研究区概况

滇中地区位于云南省中东部,处于滇东高原盆地之中($100^{\circ}43' \sim 104^{\circ}50'E$, $23^{\circ}19' \sim 27^{\circ}03'N$),土地总面积为 $93\,477.43\text{ km}^2$,占云南全省总面积的 24.4%,包括昆明、曲靖、楚雄、玉溪四个州市,覆盖县(市、区)共计 42 个。地形主要为山地以及山间盆地,西北地势高、西南地势低^[1,10]。滇中地区属中亚热带季风气候,年平均气温为 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $684.31 \sim 1777.03\text{ mm}$,植被类型多样,主要包括云南松林、华山松林、针阔混交林和阔叶林等次生林,土壤类型则以山原红壤、紫色土为主。

本文选取处于滇中地区中开发状况较好的 62 个项目区,其中昆明(26 个)、曲靖(20 个)、玉溪(11 个)、楚雄(5 个),总数量超滇中项目区的 80%,通过实地核查后确定目前都已开工建设,至少完成了一期建设任务^[1],具有较好的代表性,能够反映低丘缓坡开发建设的土壤侵蚀规律特征。

1.2 数据来源及预处理

通过对滇中地区 62 个项目区的建设开发时间统计后发现,多数项目区计划 2011 动工,2017 年完工,所以本研究将 2010 年表示项目区的开发前,2018 年表示开发完成。在进行土壤侵蚀模数计算过程中,由于低丘缓坡项目区具有面积较小($5 \sim 21\text{ km}^2$)、空间分布零散的特点,为保证土地利用信息的有效提取,利用空间分辨率优于 3 m 的多光谱影像结合实地勘察实现,但计算中部分参数所需的数据精度较高,获取小尺度详细数据难度较大,本研究中的部分参数则借鉴前人的研究成果或相应的替代方法^[12-15]。基础数据相关信息如表 1。

本研究中像元大小设为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,通过矢栅转换和重采样方法对上述表 1 中基础数据的类型和像元大小进行统一,投影坐标统一为 Xian 1980 3 Degree GK Zone 34,基准面为 D_Xian_1980。结合对低丘缓坡项目区现场踏勘,对上述评价单元栅格尺寸进行细化和校对,以提高精度。

表 1 数据来源及处理过程

Tab. 1 Data sources and data processing

数据名称	数据类型	数据来源及处理过程
地类数据	Vector	全国第二次土地调查统一时点变更数据,土地利用规划数据源于土地利用总体规划数据(2010—2020年)。
土壤数据	Vector	全国土壤数据集 1:100 万的土壤类型图,通过掩膜的方式,提取出项目区范围内的土壤类型,并根据项目区实施方案中提供的土壤数据资料进行精度修正。
降雨数据	Txt	中国气象数据共享网(http://data.cma.cn/site/index.html)的月降雨格点数据。通过 ArcGIS 中的转换工具箱,转为栅格数据,再利用掩膜的方式提取项目区月均降雨栅格。
地形数据	Gird	国家课题所提供的低丘缓坡项目区开发前的矢量图件,包括 1:10 000 的地形图以及等高线等矢量数据。通过 ArcGIS 的 3D 分析工具箱,生成 DEM 栅格数据。
遥感数据	Grid	2010 年采用美国的 Quick-bird 和 Worldview-2 卫星影像,2018 年则采用的美国的 Geoeye-1 和法国的 Pleiades-1A 卫星影像,所采用的卫星影像的空间分辨率均优于 3 m。在 ENVI 软件中对影像进行辐射定标、大气校正、正射校正、融合、镶嵌等预处理。后期用于地物识别和植被覆盖率计算。

1.3 研究方法

1.3.1 研究模型

云南省处于西南土石山区,侵蚀类型属于水力侵蚀。因此,本文土壤侵蚀研究模型采用美国农业部及其研究机构于 1997 年正式实施的 RUSLE 土壤侵蚀方程,并根据目前研究成果^[14-19]和项目区实际情况对 RUSLE 方程中部分因子取值进行调整。计算公式如下:

$$A_r = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中, A_r 为单位面积年均土壤侵蚀模数($t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($(MJ \cdot mm) \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($(t \cdot h) \cdot (MJ \cdot mm)^{-1}$);坡长因子 L 、坡度因子 S 、植被覆盖与管理因子 C 以及水土保持措施因子 P 为无量纲因子^[1,20]。

1.3.2 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力指降雨可能导致土壤侵蚀的潜在能力。 R 值计算方法较多,综合考虑数据获取的可行性以及模型对滇中地区低丘缓坡建设开发项目区的适用性,参考国内外学者研究成果,最终采用以下模型计算研究区的 R 值,此方法适用于地形复杂区域,经检验计算结果精度较高,具体公式为^[14,16]:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 73.989 \times \left(\frac{P_i^2}{P_a} \right)^{0.7387} \quad (2)$$

式中, R 为年降雨侵蚀力($(MJ \cdot mm) \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$); P_i 为第 i 月的降雨量(mm); P_a 为年平均降雨量(mm)。

1.3.3 土壤可蚀性因子(K)

土壤可蚀性因子反映在相同条件下由于土壤性

质的差异引起空间上土壤侵蚀的差异^[21-22]。土壤性质的实际测量对实验环境条件有较高要求,数据获取存在较大困难,且精确性难以保证。参考云南省已有的土壤研究成果^[17],结合现场踏勘土壤采样,对研究区各不同类型土壤赋 K 值。主要土壤类型及各对应 K 值,如表 2。

表 2 项目区土壤可蚀性因子

Tab. 2 Soil erodibility factor in the project areas

土壤类型	K 值	土壤类型	K 值
暗黄棕壤	0.28	潜育水稻土	0.25
棕壤	0.28	砖红壤	0.23
暗棕壤	0.43	赤红壤	0.33
石灰型紫色土	0.23	红壤	0.27
酸性紫色土	0.24	黄壤	0.25
潜育水稻土	0.28	燥红土	0.21
淹育水稻土	0.25	红色石灰土	0.27

1.3.4 地形因子(LS)

(1) 坡长因子(L)

坡长可以理解为地表径流产生点到径流被拦截或者中断点的水平距离,在 ArcGIS 中可通过计算累积流量的方式得到。坡长因子由以下公式计算得到:

$$L = (\lambda / 22.13)^m \quad (3)$$

$$m = \begin{cases} 0.5 & \theta \geq 5.14^\circ \\ 5 & 5.14^\circ > \theta \geq 1.72^\circ \\ 0.3 & 1.72^\circ > \theta \geq 0.75^\circ \\ 0.2 & \theta < 0.75^\circ \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ 为水平投影坡长(m); m 为坡长指数; θ 为坡度($^{\circ}$)。

开发前的 DEM 数据源于国家课题所提供的 1:10 000 地形图, 开发后的 DEM 数据是根据项目区开发方式, 对开发前 DEM 数据修正得到。具体方法为: 根据项目区平整范围数据, 结合项目区的建设开发实施方案和现场勘查, 确定土地平整方式为半挖半填, 即以平均高程点为基准, 对于超出或者低于的区域采取回填和开挖的方式^[1,18]。再结合工程开发技术标准中规定的平整标准对项目区平整区域进行高程修正, 从而得到开发后的 DEM 数据。分别将开发前后的 DEM 数据导入 ArcGIS, 通过水文分析模块, 计算得到项目区流向和流量数据, 再利用栅格计算器进一步计算得到地形因子数据。

(2) 坡度因子(S)

由于低丘缓坡项目区地形的特殊性, 其坡度特点与平原、高原和流域较为不同。为了使坡度因子算法能有效反映低丘缓坡地形地貌特征, 对 RUSLE 方程中默认的坡度因子计算公式进行部分修正。坡度为 10° 以下仍采用 RUSLE 方程中的公式, 在坡度大于 10° 时, 则采用刘斌涛等人^[15,18]提出的坡度因子修正算法, 该算法通过误差检验和精度校验, 更适用于山区地形因子的计算。坡度因子计算公式如下:

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta \leq 5^{\circ} \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & 5^{\circ} < \theta \leq 10^{\circ} \\ 20.204\sin\theta - 1.2404 & 10^{\circ} < \theta \leq 25^{\circ} \\ 29.585\sin\theta - 5.6079 & \theta > 25^{\circ} \end{cases} \quad (5)$$

1.3.5 植被覆盖和管理因子(C)

植被覆盖和管理因子是无量纲因子, 反映植被覆盖大小对土壤侵蚀的抑制程度。植被具有防止雨水溅蚀和减缓地表径流冲刷等作用, 能有效缓解区域土壤侵蚀状况。植被覆盖和管理因子的计算包括三部分: 计算归一化植被指数 $NDVI$; 计算植被覆盖率 F_c ; 根据植被覆盖率 F_c 计算得出 C 值, 公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (6)$$

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (7)$$

式中, R 为红波段; NIR 为近红外波段。 $NDVI$ 为归一化植被指数。其中, $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别是统计中置信度为 95% 和 5% 的 DN 值(像元亮度值);

F_c 为植被覆盖率。

再结合现场踏勘和项目区开发建设实施方案及规划设计图, 最终确定低丘缓坡项目区开发建设前和开发建设后的植被覆盖因子。根据蔡崇法等人^[19]研究成果, 考虑实际情况, 当 $F_c \leq 2\%$ 时地物多为水体和建设用地, 其不产生土壤侵蚀, C 值为 0。修正后的植被覆盖和管理因子计算公式如下:

$$C = \begin{cases} 0 & F_c \leq 2\% \\ 1 & 2\% < F_c \leq 10\% \\ 0.6508 - 0.3436\log_{10} & 10\% < F_c \leq 73.8\% \\ 0 & F_c > 78.3\% \end{cases} \quad (8)$$

1.3.6 水土保持措施因子(P)

P 值是无量纲数据, 指某一个时间段内采取某种水土保持措施后产生土壤侵蚀量与同等条件下不采取水土保持措施下产生的土壤侵蚀量的比值^[23], P 值的范围为 $[0, 1]$ 。该值大小与该区域土壤侵蚀模数大小呈正相关。 P 值趋于 0, 表示该区域采取的水土保持措施效果好, 土壤侵蚀状况得到改善, 反之则表示该区域水土保持措施缺乏, 土壤侵蚀量和侵蚀强度大。目前国内外学者针对于水土保持措施因子对土壤侵蚀状况影响的研究成果较少, 且缺乏固定评估标准和方法, 同一水保措施受地区影响 P 值会产生差异。本研究涉及的低丘缓坡项目区空间分布较零散, 各土地利用类型 P 值的确定主要参考相关学者研究成果和美国农业部手册^[24-26], 结合现场踏勘后根据低丘缓坡项目区各地类产生土壤侵蚀的可能性, 对各地类进行赋值, 包括: 水田(0.15)、旱地(表 1)、灌木林(1)、乔木林(1)、草地(1)、水域(0)、建设用地(0)以及裸土(1)、裸岩(0)。其中, 项目区旱地主要以坡耕旱地为主, 水土保持措施因子受坡度影响, 如表 3 所示。

表 3 旱地水土保持措施因子

Tab. 3 Dryland soil and water conservation practice factor

坡度范围	P 值
$< 5^{\circ}$	0.11
$5^{\circ} \sim 10^{\circ}$	0.22
$10^{\circ} \sim 15^{\circ}$	0.31
$15^{\circ} \sim 20^{\circ}$	0.58
$20^{\circ} \sim 25^{\circ}$	0.71
$\geq 25^{\circ}$	0.80

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀等级变化特征

根据我国 2008 年发布的 SL190 — 2007《土壤侵蚀分类分级标准》^[27],云南省属于一级水力侵蚀类型区下的二级西南土石山区,水力侵蚀强度分级见表 4。通过 ArcGIS 软件中 Spatial Analyst 工具分别对滇中项目区开发前、后土壤侵蚀模数栅格数据转换为国际单位 $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$,并按照侵蚀强度分级标准分为六类,统计各项目区土壤侵蚀等级面积及比重,如图 1 所示。

图 1 显示,整体上低丘缓坡项目区开发后与开发前相比,其土壤侵蚀状况呈现好转。其中,微度侵蚀等级占比上升,由开发前的 62.14% 上升至开发后的 74.04%,面积占比增长率为 19.1%;而轻度、中度、强度、极强和剧烈侵蚀等级的面积占比则出现不同程度的降低,其中减少量最大的是轻度侵蚀,减少 8.1%;其次是中度侵蚀等级,占比减少 3.02%;强度、极强和剧烈侵蚀占比分别减少 0.2%、0.31% 和 0.27%。表明,研究区的土壤侵蚀等级以微度、轻度和中度侵蚀为主导(占总面积比例为 $90.61\% \pm 0.39\%$),土壤侵蚀为强度、极强、剧烈等级(占总面积 $9.39\% \pm 0.39\%$)仅离散分布在部分项目区的局部区域,即楚雄州东部、东南部以及昆明市中部、东部的部分项目区内。

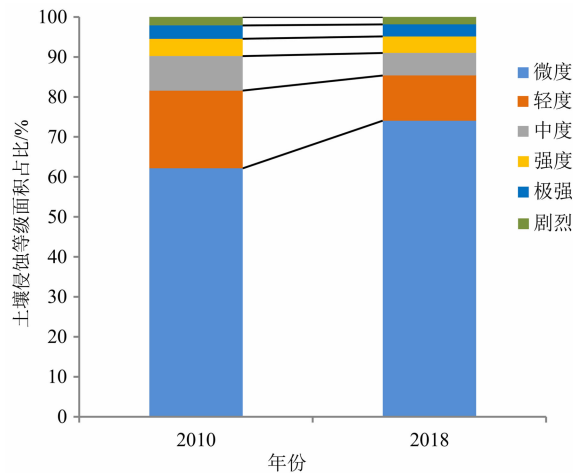


图 1 项目区开发前后各土壤侵蚀等级面积变化情况

Fig. 1 Changes in soil erosion grades before and after land development

表 4 土壤侵蚀等级

Tab. 4 Soil erosion grades

级别	平均侵蚀模数/ $(t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1})$
微度	< 500
轻度	500 ~ 2500
中度	2500 ~ 5000
强度	5000 ~ 8000
极强	8000 ~ 15000
剧烈	> 15000

从土壤侵蚀等级与环境因子的空间分布看,低丘缓坡项目区开发前后平均土壤侵蚀模数均较大的区域普遍与地形起伏大和植被覆盖率低(仅指林地、草地等生态用地)的区域具有较高的空间重合度;而坡度较小、海拔相对较低且整体植被覆盖率较高区域发生土壤侵蚀的机率和强度较低,土壤侵蚀等级与环境因子具一定相关性。

通过 ArcGIS 软件中 Spatial Analyst 工具箱的区域分析模块计算得到项目区开发前、后土壤侵蚀强度转移状况,并利用 Python 实现可视化展示(图 2)。如图所示,低丘缓坡项目区建设开发后,共有 $66.02 km^2$ 土壤侵蚀等级降低; $32.59 km^2$ 土壤侵蚀等级上升,转为更高等级的侵蚀强度。在土壤侵蚀等级降低的 $66.02 km^2$ 中, $54.11 km^2$ 转为微度侵蚀,面积占 81.96%,表明低丘缓坡建设开发使大量较高土壤侵蚀等级转为微度侵蚀。其中轻度侵蚀转为微度侵蚀共 $33.29 km^2$,贡献率为 61.52%,占轻度侵蚀总转出的 83.29%;中度侵蚀转移 $10.87 km^2$,贡献率为 20.09%,占中度侵蚀总转出的 47.14%,强度、极强和剧烈侵蚀转移 $9.95 km^2$,贡献率为 18.39%,分别占强度、极强和剧烈侵蚀总转出的 40%、34.29% 和 32.45%。可见在高侵蚀等级转为微度侵蚀等级中,以轻度侵蚀和中度侵蚀转为微度侵蚀的占比最高。而在土壤侵蚀加剧的 $32.59 km^2$ 中,微度侵蚀负向转移(即向高级侵蚀转移)面积最多,共转移 $17.61 km^2$,贡献率为 54.03%;极强侵蚀负向转移最少,共转移 $1.21 km^2$,贡献率为 3.71%。总之,相邻土壤侵蚀等级之间无论是在正向转移(指向低级侵蚀转移)还是负向转移都较容易,而跨土壤侵蚀等级转移则相对更加困难。

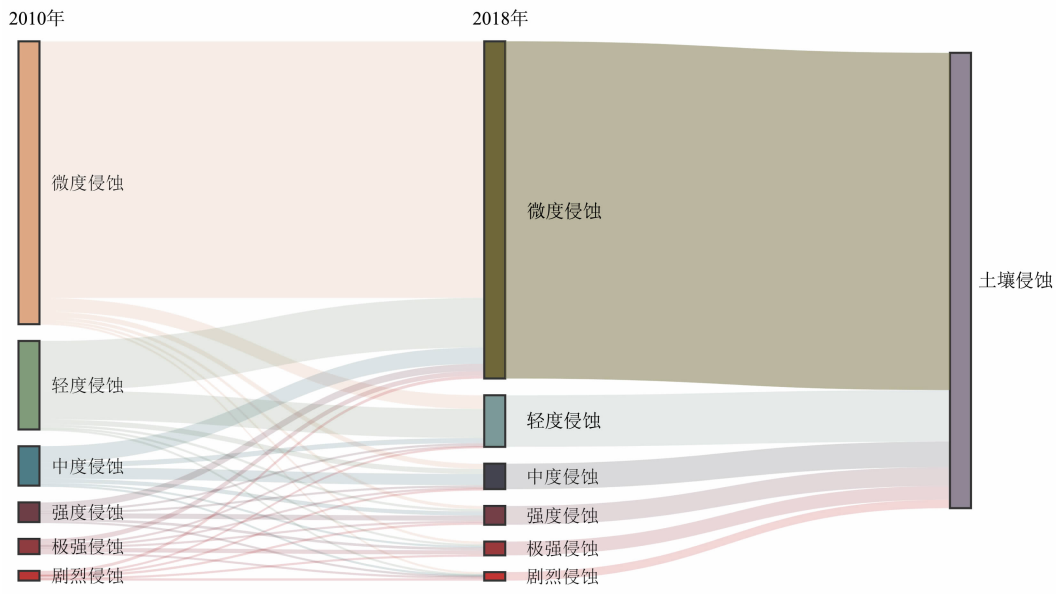


图 2 滇中地区低丘缓坡项目区整体的土壤侵蚀等级转移矩阵

Fig. 2 Overall soil erosion grades transfer matrix of the project areas of low-hill and gentle slope in central Yunnan, China

从各土壤侵蚀等级面积净变化看,轻度及更高侵蚀等级都表现为净减少,共减少 36.5 km²,其中轻度侵蚀净减少 24.78 km²,动态度为 -5.21%,面积净减少占比以及年际相对变化程度均最高;中度侵蚀面积净减少 9.34 km²,动态度为 -4.41%;强度、极强和剧烈侵蚀面积净减少 2.38 km²,动态度为 -3.33%。而微度侵蚀面积则表现为净增加,共增加 36.5 km²,动态度为 2.40%。与开发前相比,开发建设后整体上土壤侵蚀变化的趋势向好,说明低丘缓坡开发建设过程一定程度上改善了土壤侵蚀,其中以缓解轻度侵蚀最为明显。

图 3 为昆明宜良柳树湾项目区和楚雄姚安草海项目区在开发前、后土壤侵蚀等级变化图。通过对比发现,项目区土地平整范围内的土壤侵蚀等级明显下降,土壤侵蚀状况得到改善。结合实地调研以及与项目区管委会工作人员探讨后,总结导致土壤侵蚀减缓的因素主要包括:(1)低丘缓坡项目区开发建设后建设用地面积增加,导致部分新增建筑物、道路等不透水地物取代原来的耕地、裸土等,使土地利用类型转变,区域土壤侵蚀模数呈现减少趋势。(2)项目区投入运营后,低丘缓坡项目区按规划设计,采取相应的工程措施和生物措施,如坡地建挡土墙护坡、绿化工程等,这些措施都一定程度上对水土保持起到积极作用。但通过对项目区现场勘查发现,仍存在小部分项

目区在开发建设过程中忽视对生态系统安全的维护,没有做到边开发边保护,及时进行植被复种和对边坡等易引发土壤侵蚀区域采取有效的保护措施,导致项目区局部土壤侵蚀加剧。(3)由于项目区建设开发涉及人为改变地形,使项目区内局部地形起伏度和坡度减小,而地形因子是导致土壤侵蚀变化的重要的影响因素,所以项目区建设开发后局部土壤侵蚀状况会得到改善。由此可知,项目区土壤侵蚀状况的变化受到多因素的影响,表现为高度复杂性,而在开发建设中,人为因素对土壤侵蚀的影响极大,即可能改善土壤侵蚀状况,也可能加剧土壤侵蚀。因此,在低丘缓坡建设开发过程中要重视人为因素对项目区生态系统的扰动,及时采取相应的水土保持措施和建设绿色基础设施,这对区域生态环境极其重要。

2.2 坡度与土壤侵蚀

将研究区的坡度分为以下 6 个等级(<5°、5°~8°、8°~15°、15°~25°、25°~30°、>30°),对其开发前后不同坡度的面积占比进行对比分析后发现:(1)研究区整体的坡度主要集中在≤15°的范围内,其面积占比超过 75%,反映了低丘缓坡项目区中“缓坡”的地形特点。(2)项目区建设开发后,在<5°、25°~30°以及>30°的坡度范围内面积出现不同程度的增长,其中坡度>30°的面积增长最明显。而在 5°~8°、8°~15°以及 15°~25°的坡度范围内的

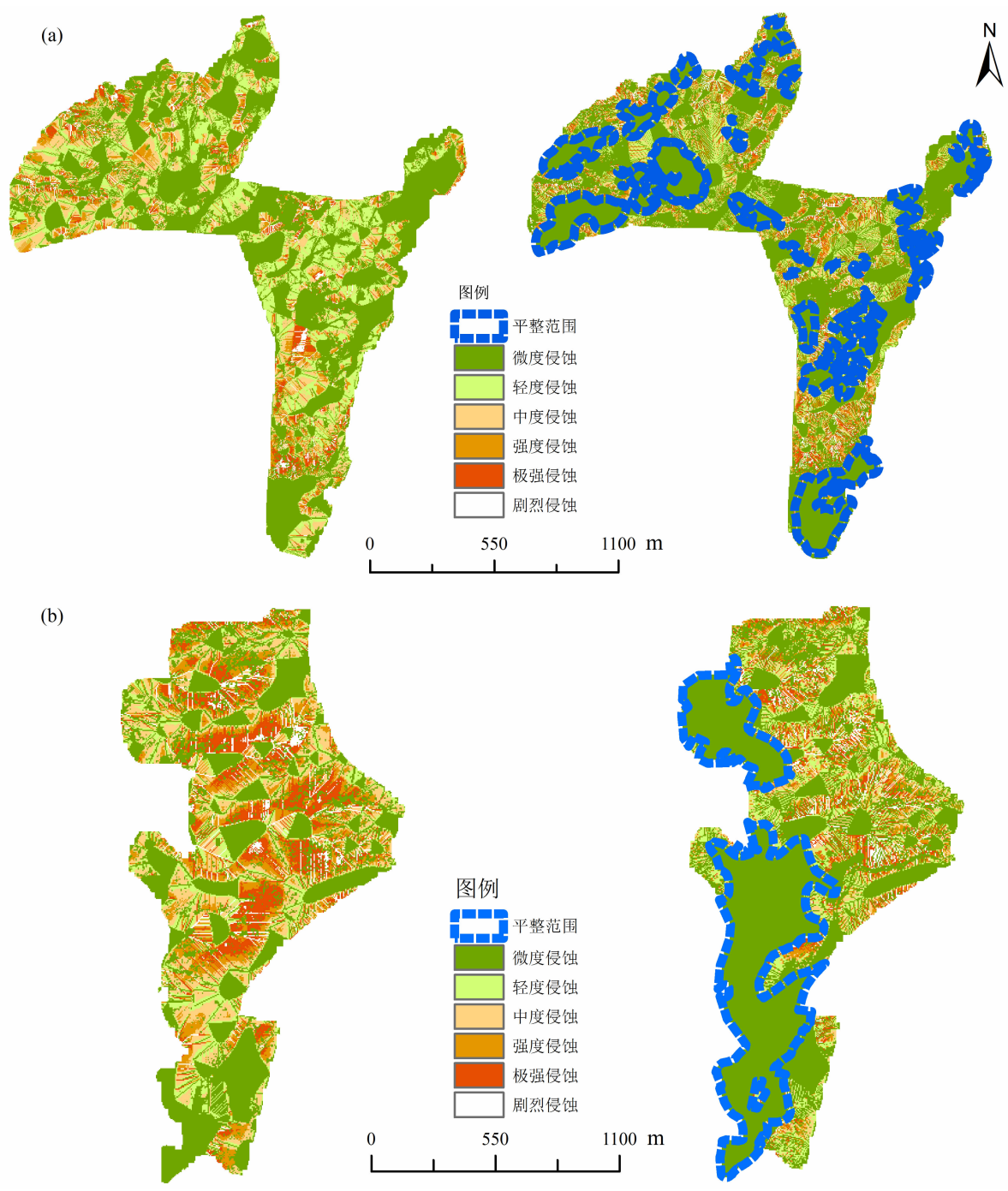


图3 典型项目区开发前后土壤侵蚀等级对比图:(a)昆明宜良柳树湾;(b)楚雄姚安草海

Fig.3 Comparison of soil erosion levels before and after land development of the project areas:

(a) LiushuBay, Yiliang, Kunming, China;(b) Caohai,Yao'an, Chuxiong, China

面积占比有所减少,其中 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 坡度范围内的面积减少最多,其面积占比由开发前的 17.24% 降至 16.46%。造成项目区开发后坡度 $< 5^{\circ}$ 和 $> 30^{\circ}$ 面积大量增加以及地形复杂性降低的原因,主要是低丘缓坡建设开发会对项目区内建设适宜性高的土地进行局部平整以及边坡开挖,从而为后期的

人类生活和生产建设活动提供有利的地形条件。将低丘缓坡项目区开发后的土壤侵蚀强度分级图与坡度分级图导入 ArcGIS 软件,通过空间叠加分析,实现项目区土壤侵蚀强度等级与坡度等级的空间连接,从而得到不同坡度等级下土壤侵蚀等级变化特征(表 5)。

表 5 坡度等级与土壤侵蚀的变化特征

Tab.5 Variation characteristics between slopes and soil erosion grades

坡度等级	土壤侵蚀面积/km ²						水土流失面积占比* /%	
	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈	占同坡度面积比	占总流失面积比
<5°	114.13	4.13	0.68	0.11	0.06	0.03	4.21	6.31
5°~8°	32.22	6.18	1.53	0.55	0.25	0.05	20.99	10.79
8°~15°	48.90	15.51	6.21	4.20	2.03	0.48	36.76	35.83
15°~25°	24.42	7.53	6.58	5.53	4.18	2.13	51.52	32.71
25°~30°	3.21	0.85	1.24	1.20	1.15	0.76	61.83	6.55
>30°	3.75	0.47	0.89	1.02	1.60	2.21	62.27	7.80
合计	226.63	34.67	17.13	12.61	9.27	5.66	25.93	100.00

注：* 水土流失面积指除微度侵蚀外的高等级土壤侵蚀面积。

对表 5 中各坡度等级土壤侵蚀状况分析后发现：(1)当坡度 <5°时,项目区主要为微度侵蚀,面积占比高达 95.79%,在该坡度范围内土壤侵蚀程度较弱,不易发生水土流失;坡度 5°~8°时,微度侵蚀面积显著减少,轻度侵蚀面积出现小幅增加,水土流失状况加剧;坡度 8°~25°时,土壤侵蚀等级以微度侵蚀、轻度侵蚀为主,二者面积占比为 73.36%±9.93%;坡度 25°~30°时,侵蚀等级表现为轻度侵蚀、中度侵蚀和强度侵蚀等级占主导;当坡度大于 30°时,则以微度侵蚀、极强侵蚀和剧烈侵蚀为主。上述数据表明,随着坡度等级增加,高等级土壤侵蚀面积逐渐增加,表现为低土壤侵蚀等级逐渐转为高等级侵蚀为主导的过程。(2)微度侵蚀面积随坡度等级提高表现出急剧减少后小幅度增加再减少的趋势,表明坡度等级与土壤侵蚀等级之间不是严格正相关关系,说明土壤侵蚀是多因素相互作用的结果,地形因素是区域土壤侵蚀的主要影响因素但非唯一的决定性因素。对项目区各坡度等级下水土流失情况分析后发现：(1)水土流失主要集中于≥8°的范围内,从坡度等级与水土流失面积耦合分析表明,当坡度≥25°时达到峰值,水土流失面积平均占比 62.05%;而在总体水土流失上,坡度在 8°~25°时水土流失面积最大,占水土流失总面积的 68.54%。通过实地调研结合遥感影像分析发现,8°~25°是低丘缓坡项目区生产和生活的集中区域。(2)随坡度等级增加,水土流失面积占同坡度等级面积比明显增加,水土流失状况进一步加剧。结果表明,尽管理论上坡度越大的项目区水土流失现象越严重,但在

实践中还需要考虑所在坡度范围面积大小以及人类活动的频率。水土保持措施的实施需重充分考虑人为因素的影响,低丘缓坡项目区建设开发过程中要做到边开发边保护。

2.3 土地利用类型与土壤侵蚀

对滇中地区以城市为单位(昆明、玉溪、曲靖和楚雄)分析其低丘缓坡项目区开发前后土地利用类型变化特征,结果表明四州市的低丘缓坡项目区开发后大部分生态用地(水田、旱地、灌木、草地)面积出现不同程度的减少,建设用地面积则表现为净增加,其中昆明市建设用地的增加幅度最大,这与昆明市对建设用地迫切需求、积极推进低丘缓坡建设开发直接相关;各州市的水域和裸岩面积变化程度较小。为进一步分析滇中地区低丘缓坡项目区土地利用类型和土壤侵蚀状况之间的相互关系,通过 ArcGIS 软件对项目区开发后的土地利用类型图与土壤侵蚀强度分级图进行叠加分析,得到土地利用类型与土壤侵蚀、水土流失的变化特征,如表 6。从该表看,各土地利用类型均以微度侵蚀为主,其中灌木林地微度侵蚀面积占比最小,但也超过 50%,旱地和水田微度侵蚀占比最高,已超过 80%;水土流失高发区主要集中在灌木林地和草地上,二者平均占同一地类水土流失面积 39.77%,占项目区水土流失总面积的 76.57%,究其原因这是由于草地和灌木覆盖范围较广且植被覆盖率较低。

本研究中建设用地的水土保持措施因子赋值为 0,认为该地类不产生土壤侵蚀。但由于低丘缓坡山地开发中人类频繁的开发建设活动会对生态系统产

生一定程度的扰动,生态用地大量转为建设用地并引起植被覆盖率的降低,导致项目区土壤侵蚀状况的变化。本文通过局部到整体的视角,探讨项目区内新增建设用地、项目区总土地面积与开发建设活动引起植被覆盖率和土壤侵蚀状况变化三者的关系(如图4,其中建设用地指新增建设用地,下文用建设用地代替)。

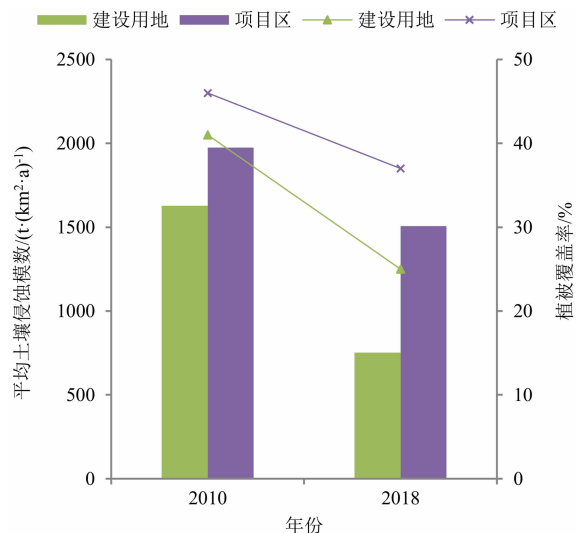


图4 开发前后植被覆盖率与土壤侵蚀状况关系

Fig. 4 Relationship between vegetation coverage and soil erosion before and after land development in the project areas

图4显示,无论是项目区建设用地还是项目区土地总面积,建设开发后的平均植被覆盖率和平均土壤侵蚀模数都出现了不同程度的下降,土壤侵蚀状况得到改善,二者在数值上表现为正相关关系。原因是开发建设后,建设用地范围内进行土地平整和路面硬化不仅导致建设用地和项目区土地总面积

上平均植被覆盖率下降,同时也使平均土壤侵蚀模数下降,土壤侵蚀状况得到改善。因此,若只考虑开发建设的影响,平均植被覆盖率和平均土壤侵蚀模数之间并不存在正相关关系。图4显示,开发后建设用地范围内平均土壤侵蚀模数仍然偏高。为了进一步探究引起其土壤侵蚀偏高的原因,在ArcGIS中将开发后的土壤侵蚀等级数据和土地平整范围叠加分析后发现,土壤侵蚀区主要处于建设用地的边坡范围内,这是由于低丘缓坡山地开发是采取依山势而建、台阶式开发,局部采取削山填谷的开发方式,必然会导致建设用地边坡范围成为土壤侵蚀的高发区,所以要针对边坡采取有效的护坡工程,抑制土壤侵蚀的加剧,避免山体滑坡等灾害的发生。

综上,为了进一步减少滇中地区低丘缓坡项目区的土壤侵蚀量,改善土壤侵蚀状况,对土地平整后的裸土边坡应采取生物和物理相结合的护坡工程,同时应加强低丘缓坡项目区绿化工程建设,提升园区的森林建设比例,增强项目区植被的生态功能,减少项目区原有的低效林地和草地,重构低丘缓坡开发建设的生态屏障,实现生产、生活和生态的持续发展^[28]。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)低丘缓坡项目区开发建设前后土壤侵蚀总量变化特征是土壤侵蚀状况呈现好转趋势,2010年、2018年各项目区年均土壤侵蚀模数分别为 $1973.9\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $1507.13\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,年均土壤侵蚀总量减少 $466.77\text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$,约82%的项目区在开发后土壤侵蚀强度降低,表现为

表6 土地利用类型与土壤侵蚀等级的变化特征

Tab. 6 Variation characteristics between land use types and soil erosion grades

土地利用类型	土壤侵蚀面积/km ²						水土流失面积占比*/%	
	微度	轻度	中度	强度	极强	剧烈	占同土地类型面积比	占总流失面积比
水田	24.87	2.91	0.32	0.08	0.01	0.01	11.81	3.98
旱地	60.18	7.34	1.99	0.87	0.65	0.36	15.70	13.41
灌木	37.03	11.63	7.64	3.82	4.06	2.17	44.19	35.06
乔木	7.70	2.56	1.27	0.45	0.53	0.24	39.61	6.04
草地	63.48	14.32	7.33	4.53	4.80	3.73	35.35	41.51
合计	193.26	38.76	18.55	9.75	10.05	6.51	30.20	100.00

注: * 水土流失面积指除微度侵蚀外的高等级土壤侵蚀面积。

高等级土壤侵蚀净转出。表明项目区在开发建设过程中采取有针对性的水土保持措施有利于缓解水土流失,低丘缓坡项目区建设开发采取开发和保护兼并的原则,对降低土壤侵蚀强度是有效的。继而分析各土壤侵蚀等级的转移情况,研究区的土壤侵蚀转移存在相邻侵蚀等级之间在正向转移(或是负向转移)都较容易,而跨土壤侵蚀等级转移则相对更加困难的规律。

本研究在前人的中、大尺度区域水土流失研究的基础上进一步深入,采取更高精度的卫星影像与实地勘察相结合的方式,提高土地利用信息提取精度,集中研究了小尺度下受人类干扰强度较大的滇中地区低丘缓坡项目区建设开发对土壤侵蚀的影响,并反映了项目区采取水土保持措施对土壤侵蚀具有缓解作用。加深了人们对低丘缓坡建设开发与水土流失之间的认识和理解,为后续科学地开发低丘缓坡提供一定的数据支撑。但本文只是统一测算了滇中地区具有代表性的62个低丘缓坡项目区开发前后总体的土壤侵蚀量,忽略项目区的开发方式以及功能定位对土壤侵蚀的影响。

(2)不同土地利用类型的水土保持能力不同。低丘缓坡项目区原有植被中水土保持功能相对较低的草地、灌木等低植被覆盖率面积较大,开发建设在一定程度上改变了土地利用类型,但开发完成后仍有较大面积低植被覆盖率的土地利用类型,如低覆盖草地和灌木林地。在此基础上,本文进一步研究建设开发与植被覆盖率和土壤侵蚀的关系,结果表明,植被覆盖率与土壤侵蚀表现出正相关关系,而产生这一异常结果的主要原因在于建设开发对于土壤侵蚀的影响过大,其对缓解土壤侵蚀的直接作用已超过引起植被覆盖率降低从而加剧土壤侵蚀的间接作用。

因此,有效提升低丘缓坡项目区的生态功能,加强低丘缓坡项目区绿化工程建设,减少项目区原有灌木和草地等单一植被种植,增加混交林种植,重构低丘缓坡开发建设的生态屏障,对于减轻低丘缓坡开发建设的水土流失和诱发的滑坡、泥石流地质灾害风险,是十分重要的^[1,28]。

(3)低丘缓坡项目区约77%的土地坡度范围为 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$,开发建设导致 $\leq 5^{\circ}$ 、 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 以及 $\geq 30^{\circ}$ 坡度范围内的土地面积增加。理论上,坡度是水土流失的主要影响因素之一,水土流失会随坡度的增加

而加剧。但通过对水土流失面积分析发现,各项目区实际的水土流失重灾区主要位于 $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 的坡度范围内,原因是低丘缓坡项目区的开发建设活动主要集中在 $8^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 这一坡度范围,说明人为因素对低丘缓坡开发建设的土壤侵蚀影响较大。

综上,本文探讨了低丘缓坡建设开发对项目区土壤侵蚀影响,以及土地利用类型、地形和植被覆盖率与土壤侵蚀的关系,为后续低丘缓坡建设过程中有效避免水土流失提供建议和依据。限于时间和实验条件,本研究只进行初步探索,仅研究了低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀的影响,尚不能全面反映建设开发对项目区内各生态系统服务的影响。如建设用地的增加虽减少项目区土壤侵蚀量,改善土壤侵蚀状况,但不透水表面占比增加,导致生态用地面积骤减,植被覆盖率降低,可能会引起项目区固碳释氧量和水源涵养量降低,使水源涵养服务和固碳释氧服务与土壤保持服务出现相互制约的权衡关系,最终可能会导致项目区生态系统服务供给失衡。这将是后期需要研究和探讨的方向之一。

3.2 结论

本研究以低丘缓坡建设开发示范省份中的云南省为例,选取滇中地区中具有代表性的62个项目区为研究区,围绕“低丘缓坡建设开发前后土壤侵蚀总量测算—坡度与土壤侵蚀耦合分析—土地利用类型与土壤侵蚀耦合分析—平均植被覆盖率与平均土壤侵蚀量间的关系—低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀的影响”研究主线展开,探究低丘缓坡建设开发对土壤侵蚀状况的影响,结论如下:

(1)只要采取恰当的工程措施和生物措施,低丘缓坡建设开发并不会导致水土流失的加剧,增大滑坡泥石流等地质灾害的风险。

(2)低丘缓坡建设开发导致水土流失加重的区域主要是边坡形成的坡度陡升地段,因此在低丘缓坡建设开发过程中充分考虑山地的立体结构,依据山体不同位置和坡度,宜建则建、宜林则林,尽量避免削峰填谷式的建设开发方式,可以有效避免低丘缓坡建设开发对水土流失的负面影响。

(3)低丘缓坡建设开发过程中如何保留足够的林地、草地等生态用地,提升生态用地的生态系统质量,对于改善低丘缓坡建设开发的水土流失状况也十分重要。因此尽量保留低丘缓坡原有林地、草地,加强绿化工程建设,提升低丘缓坡项目区生态服务

功能,做到边建设边保护,应该是低丘缓坡建设开发必须遵循的重要原则。另外,借鉴学习欧洲基于自然解决方案(NBS),在项目区内有选择地建设绿色基础设施,例如建设雨水公园和植被排水系统等;种植混交林,建立绿色走廊。保护现有的重要的生态廊道,防止因为建设开发导致的绿色隔离,提升低丘缓坡项目区的生态可持续性,减少低丘缓坡建设开发的生态风险。

致谢:对郭润展同学在论文修改中遥感影像处理及数据校正方面的贡献表示感谢。

版权申明:本文是在第一作者阚欣玥学位论文《基于RS和GIS的低丘缓坡开发建设土壤侵蚀研究》基础上的后续研究,采用了原文的方法,但在关键理论与公式上进行了优化,并在核心的遥感影像的数据上进行了修改,提高了遥感影像数据的空间分辨率,从而提高计算结果的精度,以及进一步补充完善了开发建设活动、植被覆盖率、土壤侵蚀状况三者关系的相关分析。同时,对文中相关表格由于计算过程中出现的错误进行核查更正,保证了数据的准确性。硕士论文版权归属原培养单位:云南财经大学城市与环境学院。特此申明。

参考文献 (References)

- [1] 阚欣玥. 基于RS和GIS的低丘缓坡开发建设土壤侵蚀研究——以滇中地区为例[D]. 昆明:云南财经大学,2020:21-33. [KAN Xinyue. Soil erosion research based on remote sensing and GIS in mild slope of low mountains and hills: a case study in central of Yunnan Province[D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics,2020:21-33] DOI: 10. 27455/d. cnki. gycmc. 2020. 000108
- [2] 徐德明. 推进低丘缓坡土地开发利用支撑工业化城镇化健康发展——在低丘缓坡未利用地开发利用试点现场观摩会上的讲话[J]. 国土资源通讯,2012(6):13-15. [XU Deming. Promoting the development and utilization of mild slope of low mountains and hills to support the healthy development of industrialization and urbanization[J]. National Land & Resources Information,2012(6):13-15]
- [3] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等. RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J]. 水土保持研究,2004,11(4):80-83. [CHEN Yunming, LIU Guobin, ZHENG Fenli, et al. Proceeding and application on soil erosion model of RUSLE [J]. Research of Soil and Water Conservation,2004, 11 (4): 80 - 83] DOI: 10. 3969/j. issn. 1005 - 3409. 2004. 04. 017
- [4] YODER D, LOWN J. The future of RUSLE: inside the new revised universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50 (5): 484 - 493. DOI: 10. 1016/0016 - 7061(95)00030 - R
- [5] 李凤,吴长文. RUSLE 侵蚀模型及其应用(综述)[J]. 水土保持研究,1997,4(1):109-112. [LI Feng, WU Changwen. The evaluation on the erosion model of RUSLE and its application[J]. Research of Soil and Water Conservation,1997,4(1):109-112]
- [6] 邵颂东,王礼先,周金星. 国外土壤侵蚀研究的新进展[J]. 水土保持科技情报,2000(1):32-36. [SHAO Songdong, WANG Lixian, ZHOU Jinxing. New progress of soil erosion research in foreign countries[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2000(1):32-36]
- [7] 杨志成,张卓栋,张科利,等. 基于普查样点的贵州省耕地土壤侵蚀空间分布[J]. 中国水土保持科学,2020,18(2):62-68. [YANG Zhicheng, ZHANG Zhuodong, ZHANG Keli, et al. Spatial distribution of cropland soil erosion in Guizhou Province based on sample data of the first national water census[J]. Science of Soil and Water Conservation,2020,18(2):62-68] DOI: 10. 16843/j. sswc. 2020. 02. 008
- [8] MOSAVI A, SAJEDI-HOSSEINI F, CHOUBIN B, et al. Susceptibility mapping of soil water erosion using machine learning models[J]. Water,2020,12(7). DOI: 10. 3390/w12071995
- [9] 方广玲,香宝,赵卫,等. 基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报,2015,29(3):6-12. [FANG Guangling, XIANG Bao, ZHAO Wei, et al. Study on soil erosion in LaSa river basin based on GIS and RUSLE[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(3):6-12] DOI: 10. 13870/j. cnki. stbxb. 2015. 03. 002
- [10] 刘致远. 基于遥感和GIS技术的滇中地区土壤侵蚀研究[D]. 昆明:云南师范大学,2019:2-14. [LIU Zhiyuan. Soil erosion research based on remote sensing and GIS technology in central Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2019:2-14]
- [11] 邵方泽,张慧,缪旭波. 基于RUSLE模型的南京市2006-2014年水土侵蚀时空分布特征[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):264-269. [SHAO Fangze, ZHANG Hui, MIAO Xubo. Spatial and temporal distribution characteristics of soil erosion based on RUSLE model from 2006 to 2014 in Nanjing City[J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(17):264-269] DOI: 10. 15889/j. issn. 1002 - 1302. 2017. 17. 069
- [12] 朱悼,王天巍,蔡崇法. 基于模糊神经网络与GIS的区域土壤侵蚀快速评价[J]. 农业工程学报,2010,26(1):103-107. [ZHU Dun, WANG Tianwei, CAI Chongfa, et al. Rapid assessment of regional soil erosion based on fuzzy neural system and GIS[J]. Transactions of the CSAE,2010, 26 (1): 103 - 107] DOI: 10. 3969/j. issn. 1002 - 6819. 2010. 01. 017
- [13] 徐天蜀,彭世揆,岳彩荣. 基于GIS的小流域土壤侵蚀评价研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2002,26(4):43-46.

- [13] XU Tianshu, PENG Shikui, YUE Cairong. Evaluation of soil erosion based on GIS in a small watershed[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2002, **26**(4): 43 - 46] DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2002.04.011
- [14] 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, ZENG 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] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2011.03.027
- [15] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. 中国水土保持, 2015(8): 49 - 51. [LIU Binta, SONG Chunfeng, SHI Zhan, et al. Correction algorithm of slope factor in universal soil loss equation in earth-rocky mountain area of southwest China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(8): 49 - 51] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2015.0224
- [16] SILVA A M D. Rainfall erosivity map for Brazil[J]. Catena, 2004, **57**(3): 251 - 259. DOI: 10.1016/j.catena.2003.11.006
- [17] 于德永, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于遥感技术的云南省生态系统水土保持价值测量[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 174 - 178. [YU Deyong, PAN Yaozhong, LONG Zhonghua, et al. Value evaluation of conserving water and soil for ecosystem supported by remote sensed technique in Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, **20**(2): 174 - 178] DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2006.02.042
- [18] 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 203 - 206 + 211. [YANG Qinke, GUO Weiling, ZHANG Hongming, et al. Method of extracting LS factor at watershed scale based on DEM [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, **30**(2): 203 - 206 + 211] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.02.035
- [19] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(2): 19 - 24. [CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **14**(2): 19 - 24] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2000.02.005
- [20] RENARD K G, FOSTER G R, YODER D C, et al. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1994, **49**(3): 213 - 220. DOI: 10.1111/j.2044-8279.1937.tb03176.x
- [21] 毕小刚, 段淑怀, 李永贵, 等. 北京山区土壤流失方程探讨[J]. 中国水土保持科学, 2006, **4**(4): 6 - 13. [BI Xiaogang, DUAN Shuhuai, LI Yonggui, et al. Study on soil loss equation in Beijing [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, **4**(4): 6 - 13] DOI: 10.16843/j.sswc.2006.04.002
- [22] 董磊, 彭明春, 王崇云, 等. 基于 USLE 和 GIS/RS 的滇池流域土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(2): 11 - 14. [DONG Lei, PENG Mingcun, Wang Congyun, et al. Research on soil erosion based on the USLE model and RS/GIS in the Dianchi lake watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, **19**(2): 11 - 14]
- [23] 朱虹, 唐婷婷, 蔡艳蓉. 土壤侵蚀预报模型中的水土保持措施因子研究进展[J]. 科技展望, 2015, **25**(21): 222 - 224. [ZHU Hong, TANG Tingting, CAI Yanrong. Research progress of soil and water conservation measures in soil erosion prediction model [J]. Science and Technology, 2015, **25**(21): 222 - 224] DOI: 10.3969/j.issn.1672-8289.2015.21.196
- [24] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, **16**(5): 1 - 20. [WANG Wanzhong, JIAO Juying. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, **16**(5): 1 - 20]
- [25] TENG Hongfen, ROSSEL R A V, SHI Zhou, et al. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia [J]. Environmental Modelling & Software, 2016 (77): 156 - 167. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.11.024
- [26] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(2): 337 - 344. [LU Jianzhong, CHEN Xiaoling, LI Hui, et al. Soil erosion changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake basin [J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(2): 337 - 344] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.057
- [27] SL190-2007. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. [SL190-2007. Standards for classification and gradation of soil erosion[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008]
- [28] LI Zhongwu, NING Ke, CHEN Jia, et al. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **260**: 121109. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121109

Influence of Land Construction and Development on Soil and Water Loss in Low Hill Slope

KAN Xinyue, ZHANG Hong*

(School of Urban and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650000, China)

Abstract: Whether and to what extent the soil and water loss is caused by engineered activities in the areas of low-hill and gentle slope has been a controversial issue in academic society. In this study, Yunnan province, which was the first to campaign for commercial exploitation of low-hills and gentle slopes in China, was taken as case study for field investigation on soil erosion. 62 engineering projects in central Yunnan were selected as research targets, representative of typical land utilizations in low-hill and gentle slope areas. The Revised Universal Soil Erosion Equation (RUSLE) was used to quantitatively analyze the field observations of the in-situ soil erosions in the projects and their temporal and spatial variation characteristics in 2010 and 2018 (i. e., before and after the implementation of these projects). And then the influence of changes in topography, land use type and vegetation coverage on soil erosion caused by the projects was elaborated. The results showed that: (1) Generally, the soil erosion incurred by 62 project in central Yunnan tended to be improved after the execution of the projects, which was exemplified by a net increase in the area with micro-erosion grade; (2) Low-cover grassland, shrub and sloping farmland $\geq 15^\circ$ had weak soil and water conservation ability; Among them, grassland and shrubs had a large area of soil erosion, accounting for 76.57% of the total area of soil erosion; (3) The areas with high soil erosion were mainly concentrated in the areas with a slope of $\geq 8^\circ$. If only the area causing soil erosion is considered, the area with slopes between $8^\circ \sim 25^\circ$ had the most serious soil erosion, accounting for 68.54% of the total; The probability in causing soil erosion was the highest in the areas with a slope of $\geq 25^\circ$, and the average area of soil erosion accounted for 62.05% of the specific sloping area. In summary, this paper revealed the influence of land development on soil erosion in low hill slope, provided further data support for soil erosion control, hazard assessment in the project area and reference for regional ecological restoration and comprehensive management.

Key words: low hill and gentle slope; land utilization; soil erosion; RUSLE model; central Yunnan