

基于径流小区实测的干热河谷土壤侵蚀荟萃分析

何敏怡¹, 钟荣华¹, 郭乾坤², 段兴武¹, 单志杰²

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 为详细了解干热河谷地区的土壤侵蚀状况, 通过对径流小区资料的广泛收集、整理和标准化分析, 对干热河谷主要土地利用类型的土壤侵蚀模数和水土保持措施效益进行定量评价, 并将当地主要土地利用类型平均坡度下的土壤侵蚀模数与容许土壤流失量进行对比分析。结果表明: (1) 灌草地、农地、园地和裸地等主要土地利用类型标准坡长坡度条件下的土壤侵蚀模数分别为 110.88, 389.58, 320.66, 507.87 t/(km² · a), 呈现出裸地最大, 农地和园地次之, 灌草地最低的特点。 (2) 封禁、水平阶整地、梯田和植物篱等水土保持措施均能较好地发挥水土保持效益, 平均可以减少 72% 的土壤侵蚀量。 (3) 各流域主要土地利用类型, 特别是农地和园地在当地平均坡度下的土壤侵蚀模数明显高于容许土壤流失量, 说明该地区土壤侵蚀状况仍相当严峻。研究结果将有助于进一步深化对干热河谷地区土壤侵蚀规律的认识, 并为后续水土流失治理和水土保持措施优化配置提供技术支撑。

关键词: 干热河谷; 径流小区; 土壤侵蚀; 水土保持措施; 容许土壤流失量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0291-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.035

A Meta-analysis on Soil Erosion in the Dry-hot Valleys Based on Runoff-plot Data

HE Minyi¹, ZHONG Ronghua¹, GUO Qiankun², DUAN Xingwu¹, SHAN Zhijie²

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048)

Abstract: In order to gain a detailed understanding of the soil erosion status in the dry-hot valley region, in this study, the measured data from runoff plots in dry-hot valleys were widely collected, organized and analyzed, thus the soil erosion modulus under the average slope of the local main land use types were estimated and compared with the allowable soil loss amount. The results indicated that: (1) The soil erosion modulus of shrub-grass land, agricultural land, orchard land and bare land under the standard slope length and slope gradient was 110.88, 389.58, 320.66 and 507.87 t/(km² · a), respectively, indicating that soil erosion modulus in the bare land was the highest, followed by the agricultural land, orchard land and shrub-grass land. (2) Soil and water conservation measures such as lockdowns, horizontal terraces, terraces and hedgerows all played an important role in reducing soil erosion with the average reduction of 72%. (3) The soil erosion modulus of the main land use types, especially agricultural land and orchard land in all the dry-hot valleys, were significantly higher than the allowable soil loss under the local average slope, indicating that the soil erosion situation in the region was still quite severe. This study could help to further deepen the understanding of the soil erosion principles in the dry-hot valleys and provide important technical supports for subsequent soil erosion control and optimal allocation of soil and water conservation measures.

Keywords: hot-dry valley; runoff plot; soil erosion; soil and water conservation measures; soil loss tolerance

作为全球最为严重的生态环境问题之一, 土壤侵蚀往往造成土地生产力下降、江河湖库淤积、水体富营

养化等问题^[1]。据统计^[2], 中国水土流失面积高达 2.67×10^6 km², 占国土面积的 27.8%, 其中西南高山峡谷

收稿日期: 2023-03-31

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42007068)

第一作者: 何敏怡 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: Heminyi@mail.ynu.edu.cn

通信作者: 郭乾坤 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: guoqiankun@iwhr.com

区、西北黄土高原区和东北黑土区的水土流失问题尤为突出。为科学认识土壤侵蚀规律,有效减轻水土流失危害,国内外学者基于径流小区方法开展了大量相关研究,建立了 USLE^[3] 和 RUSLE^[4] 等经典土壤侵蚀预报模型,定量评价了中国、欧洲、澳大利亚、巴西、非洲^[5-7] 等不同地区主要土地利用的土壤侵蚀模数和水土保持措施的效益。我国基于大量径流小区实测资料,建立了一系列区域性水土流失方程,并最终建立了中国土壤流失方程^[8]。同时,一些学者基于径流小区实测资料,采用荟萃分析方法对全国不同土地利用土壤侵蚀模数和水土保持措施效益进行定量评价^[5-6,9-10]。荟萃分析是一种用于对不同研究成果定量分析和综合评价的方法,比传统的叙述性或定性分析更有优势^[11],已有越来越多的应用于生态学领域的研究^[12]。目前,径流小区荟萃分析主要集中在全国尺度或西北黄土高原区和东北黑土区,西南高山峡谷区特别是干热河谷地区的研究却较为缺乏。因此,有必要收集径流小区实测资料并开展荟萃分析。

干热河谷是指在特殊地形、气候等因素的影响下形成的气温高、湿度低的河谷区域,主要分布在我国西南横断山高山峡谷区^[13]。该区具有高温低湿、植被盖度低、自然环境恶劣、人类活动集中、土壤侵蚀严重的特点,是长江、澜沧江、怒江和元江等重要河流及其支流的主要泥沙源区^[13]。近年来,不少学者在干热河谷地区开展了土壤侵蚀相关研究,如以沟蚀发育为主的侵蚀机理研究^[14-15]和以植被恢复为主的生态修复研究^[16]。值得注意的是,尽管干热河谷地区也存在一定的径流小区观测研究^[17-19],但针对土壤侵蚀模数和水土保持措施效益定量评价的研究还比较缺乏,与侵蚀机理研究和生态修复研究相比存在明显的短板,一定程度上影响对该区域水土流失的准确认识。

基于上述研究不足,本文拟广泛收集干热河谷区径流小区测验资料,运用荟萃分析的方法,定量评价干热河谷地区主要土地利用的侵蚀模数及主要水土保持措施的效益。研究目标包括:(1)定量评价干热河谷地区 4 种不同土地利用类型的土壤侵蚀模数,并分析其差异;(2)分析评价干热河谷区主要水土保持措施的效益;(3)评价不同土地利用土壤侵蚀模数与土壤容许流失量的差异。研究结果有助于进一步深化对干热河谷地区土壤侵蚀规律的认识,并可为后续水土流失治理和水土保持措施优化配置提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据收集与汇编

干热河谷位于我国西南横断山区高山峡谷区,主要分布在金沙江、澜沧江、怒江和元江的干支流峡谷,受印度洋暖湿气流和高山峡谷地形地貌造成的“焚风

效应”影响,呈现出高温低湿、植被稀疏的脆弱生态环境^[13],其空间范围见图 1。

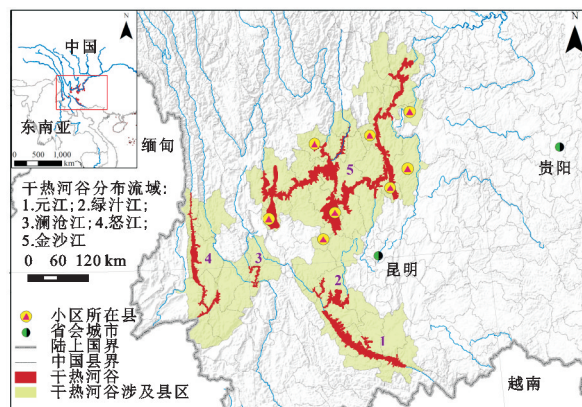


图 1 干热河谷涉及县区及通过初步筛选文献的径流小区分布

为了尽可能全面收集干热河谷地区径流小区测验资料,对公开发表的论文、专著、资料汇编、博士和硕士论文等多种资料形式进行了认真查阅,其中中文资料主要在中国知网(CNKI, <https://kns.cnki.net>)查阅,英文论文主要在 Web of Science(<https://www.webof-science.com>)上查询。检索关键词主要包括“产流”“产沙”“干热河谷”“径流小区”“径流量”“土壤侵蚀”“水土流失”“dry-hot valley”“runoff”“soil loss”“soil erosion”等。同时,搜集部分未公开发表的监测资料。最终通过初步筛选的文献为 35 篇(表 1),包括 129 个小区共 236 个小区年,主要分布在中国西南地区的 8 个县(市、区)(图 1),然后根据标准进行二次筛选:(1)文献至少要包含 1 组土壤侵蚀模数的数据信息;(2)每个径流小区测验数据的观测时段不少于 1 年;(3)不选择形状不规则或面积过小的微型小区,要求小区斜坡坡长至少为 5 m;(4)径流小区耕作与管护等日常工作规范;(5)径流小区位于干热河谷地区。最终获得 147 个小区年(表 1)的土壤侵蚀模数数据。这些数据主要分布在元谋、牟定、盐边、昭通、东川及宁南等金沙江典型干热河谷区,在干热河谷地区具有较好的代表性。

每一条径流小区测验记录均收集地理位置(含经度、纬度)、土壤类型、土地利用类型、植被覆盖度、降雨量、降雨天数、水土保持措施、观测时段、坡长、坡度、径流量和侵蚀模数等信息。在收集到的 147 个小区年数据中,观测时段为 1997—2017 年,小区坡长为 5~25 m,坡度为 5°~26.5°。根据干热河谷地区的实际情况,并综合考虑径流小区资料收集情况,将土地利用类型划分为灌草地、农地、园地和裸地等 4 种类型,将水土保持措施划分为封禁、水平阶整地、梯田和植物篱等 4 种类型。

1.2 径流小区数据标准化分析

为了使不同规格小区的实测数据更具有可比性,本研究首先对土壤侵蚀模数进行标准化处理^[53]。根

据中国土壤流失方程(CSLE)^[8]所确定的标准小区条件,并参考 USLE 标准小区规格,将本文的换算标准定为坡长为 22.13 m,坡度为 5°,则坡长因子和坡度因子的换算公式为^[5,54-56]:

$$S=\begin{cases}10.8\sin\theta+0.03 & \theta<5^{\circ} \\ 16.8\sin\theta-0.50 & 5^{\circ}\leq\theta<10^{\circ} \\ 21.9\sin\theta-0.96 & \theta\geq10^{\circ}\end{cases}\quad (1)$$

表 1 通过初步筛选与最终筛选的文献信息

序号	土地利用 类型	水土保持 措施	观测 时间/a	小区数	小区 年数/a	地理 位置	参考 文献
1*	灌草地	封禁、水平阶整地	2009	2	2	元谋	董莉等 ^[20]
2*	灌草地	—	1998—1999	4	8	牟定	王震洪等 ^[21]
3*	灌草地	封禁	2003	3	3	元谋	陈奇伯等 ^[22]
4*	园地、裸地	—	2014—2016	6	12	元谋	何周窃等 ^[23]
5*	灌草地	封禁、水平阶整地	2004—2005	3	6	元谋	田波等 ^[24]
6*	灌草地	水平阶整地	2006—2010	3	9	元谋	王建文等 ^[25]
7*	灌草地、裸地	—	2013—2015	6	16	元谋	张明忠等 ^[26]
8*	灌草地	—	1998—1999	4	8	元谋	纪中华等 ^[17]
9*	农地、裸地	—	2010—2012	6	14	盐边	王洪等 ^[27]
10*	灌草地	封禁、水平阶整地	2008	3	3	元谋	王建文等 ^[28]
11*	农地	植物篱、梯田	1995—1997	6	12	昭通、东川	杨子生 ^[29]
12*	灌草地	水平阶整地	2010—2011	5	8	元谋	刘海等 ^[30]
13*	农地、裸地	—	2013—2017	7	24	盐边	游翔等 ^[31]
14*	农地	植物篱	1997—1998	8	16	宁南	孙辉等 ^[32]
15*	灌草地、农地、裸地	梯田	2007—2008	5	10	A	南岭等 ^[33]
16	灌草地	封禁、水平阶整地	2005	3	3	元谋	王静等 ^[34]
17	农地	植物篱	2005—2006	1	2	元谋	龙会英等 ^[35]
18	灌草地、裸地	—	2005—2012	4	24	元谋	方东海等 ^[36]
19	灌草地	—	2001—2002	4	8	元谋	刘光华等 ^[37]
20	灌草地、农地、园地、裸地	—	2000—2010	—	—	红河流域	顾治家 ^[38]
21	灌草地	封禁	—	3	3	元谋	刘芝芹等 ^[39]
22	灌草地、农地、裸地	—	—	5	—	会泽	孟广涛等 ^[40]
23	灌草地、农地、裸地	—	2001	7	7	宾川	杨子生 ^[41]
24	灌草地、农地、园地、裸地等	—	1960—2000	—	—	彝良	杨子生等 ^[42]
25	灌草地、农地、裸地	水平阶整地	2010—2011	5	10	元谋	刘海 ^[43]
26	农地	植物篱	2004—2005	1	3	元谋	史亮涛等 ^[19]
27	灌草地	—	2017	6	6	元谋	杨谟舟等 ^[44]
28	裸地	—	2012	1	1	盐边	王洪等 ^[45]
29	农地	梯田	2014	6	6	东川	肖理等 ^[46]
30	农地	梯田	—	—	—	B	杨子生等 ^[47]
31	农地、园地、裸地	—	—	—	—	C	杨子生等 ^[48]
32	灌草地	—	2019—2020	4	8	盐边	胡斌等 ^[49]
33	灌草地、裸地	—	—	4	—	元谋	拜得珍等 ^[50]
34	灌草地	—	—	—	—	东川	Lin 等 ^[51]
35	灌草地、裸地	—	2006	4	4	茂县	Xu 等 ^[52]

注：* 表示本研究最终筛选的文献序号；A 表示金沙江下游干热河谷区；B 表示滇东北山区；C 表示云南金沙江流域各县市。

基于小区实测土壤侵蚀模数,计算各土地利用类型的加权平均侵蚀模数和标准差等基本统计量。以往的研究^[57]表明,土壤侵蚀模数具有显著的年际变化特征,在较长的观测周期获得的数据更可靠。根据

中心极限定理,样本的标准误差与观测次数的平方根呈反比^[54]。因此,观测周期(plot year)的平方根被用作本研究中计算平均值和标准差的加权因子^[5]。

$$A_{lc} = \sum_{i=1}^m (A_{lci} \sqrt{n_{lci}}) / \sum_{i=1}^m \sqrt{n_{lci}} \quad (4)$$

式中: A_{lc} 为实施水土保持措施 c 和土地利用 l 的径流小区的土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; A_{lci} 为径流小区 i 的平均土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; n_{lci} 为径流小区 i 的小区年。

1.3 不同土地利用土壤侵蚀危险程度分析

容许土壤流失量(简称 T 值)是指“根据保持土壤资源及其生产能力而确定的年土壤流失量上限,通常小于或等于成土速率^[58]”,它是评价区域水土流失的基础依据。将其与研究区土壤侵蚀模数进行对比分析,有助于清晰认识当地土壤侵蚀状况,对制定该区合理的水土流失控制目标具有重要意义。因此,本文将计算干热河谷不同流域(金沙江、澜沧江、礼社江、绿汁江、怒江和元江)主要土地利用(灌草地、农地和园地)实际土壤侵蚀模数,并与容许土壤流失量进行对比,以评价土壤侵蚀危险程度。

基于径流小区实测资料计算得到的不同土地利用标准坡长坡度下的土壤侵蚀模数,再根据干热河谷各主要流域主要土地利用的平均坡度,按公式(5)可计算得到各流域各土地利用类型当地平均坡度下的土壤侵蚀模数:

$$A_{wl} = A_u S_{wl} \quad (5)$$

式中: A_{wl} 为流域 w 内土地利用 l 在当地平均坡度下的土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; S_{wl} 为流域 w 内土地利用 l 在当地平均坡度下的坡度因子,根据公式(1)

计算,其中坡度值根据相应流域的土地利用与地形数据计算。为了更好地反映不同流域内不同土地利用的危险程度,将 A_{wl} 按标准划分为5个等级^[5,59]: $<1T$ 、 $1\sim 2T$ 、 $2\sim 4T$ 、 $4\sim 8T$ 和 $>8T$,其中, T 为容许土壤流失量,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[60],西南地区 T 值为 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;根据干热河谷地区相关研究^[61],元江干热河谷燥红土的 T 值为 $150 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。考虑到干热河谷本地的相关研究更符合区域土壤侵蚀特点,本文基于该 T 值 $[150 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 计算土壤侵蚀危险程度。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用土壤侵蚀模数对比

由表2和图2可以看出,无措施情况下,灌草地、农地、园地和裸地的实测土壤侵蚀模数分别为 $405.34, 1\,748.58, 1\,184.78, 1\,827.47 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,灌草地的侵蚀模数明显低于其他3种土地利用类型(图3),以裸地为对照计算,得到灌草地、农地和园地的土壤侵蚀模数分别为裸地的 $22.17\%, 95.62\%$ 和 64.80% 。

考虑到不同径流小区的坡长、坡度不尽一致,将标准化后的不同土地利用的土壤侵蚀模数进行对比。可以看出,无措施情况下,灌草地、农地、园地和裸地的土壤侵蚀模数分别为 $110.88, 389.58, 320.66, 507.87 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (表2、图2),灌草地的土壤侵蚀模数明显低于其他3种土地利用类型。以裸地为对照计算,得到灌草地、农地和园地的土壤侵蚀模数分别为裸地的 $21.84\%, 76.71\%$ 和 63.14% 。由此可知,灌草地土壤侵蚀模数最小,农地和园地侵蚀模数较为接近,裸地侵蚀模数最大。

表2 不同土地利用类型土壤侵蚀模数的加权平均值和标准差

土地利用类型	水土保持措施	降雨量/ mm	坡度/ (°)	坡长/ m	土壤侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	标准化土壤侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	小区年/ a
灌草地	—	476.53±187.66	11.47±5.07	17.41±6.56	405.34±697.34	110.88±174.37	27
	封禁+水平阶整地	428.46±111.67	8.25±2.50	12.50±5.00	9.25±2.85	6.47±1.14	4
	封禁	386.05±108.62	7.83±2.04	11.67±4.08	41.22±28.44	35.13±29.82	6
	水平阶整地	255.44±32.74	8.00±0	10.00±0	19.11±10.72	15.46±8.67	10
农地	—	696.46±99.24	15.19±4.45	18.11±3.20	1748.58±2668.38	389.58±439.71	38
	梯田	—	13.33±5.77	23.33±5.77	659.71±192.56	204.73±130.01	4
	植物篱	573.21±182.82	21.29±3.41	21.43±3.63	1058.57±2454.52	141.53±321.57	16
园地	—	659.46±66.88	15.00±5.48	10.00±0	1184.78±1116.10	320.66±218.81	6
裸地	—	644.01±83.81	13.47±4.99	18.49±5.17	1827.47±1692.38	507.87±404.64	36
总计		521.94±189.08	13.65±5.01	17.16±5.55	1154.83±1923.12	282.35±373.10	147

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.2 不同水土保持措施的效益对比

从表2可以看出,灌草地的水土保持措施主要是封禁和水平阶整地,农地的水土保持措施主要是梯田和植物篱。运用表2中计算出的各土地利用类型不

同措施下的标准化土壤侵蚀模数与无措施下的土壤侵蚀模数相比,得出各水土保持措施的效益,其中,灌草地水平阶整地与封禁措施均能显著降低土壤侵蚀:水平阶整地可减少80%以上的土壤侵蚀,封禁可减

少 68%;农地梯田和植物篱等措施可分别减少 47%和 64%的土壤侵蚀量。总体来看,干热河谷地区各水土保持措施平均可以减少 72%的土壤侵蚀量。

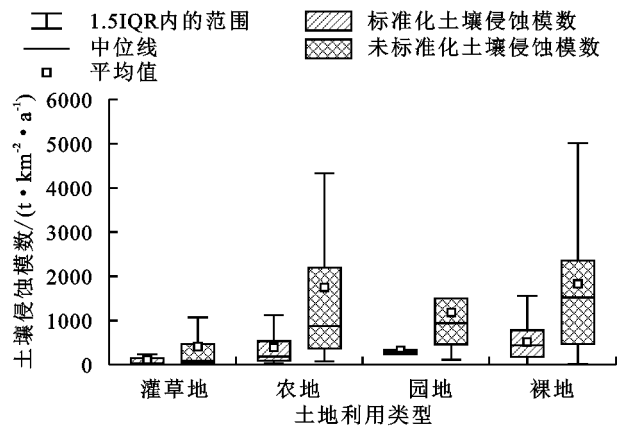


图 2 无措施下不同土地利用类型土壤侵蚀模数的比较分析

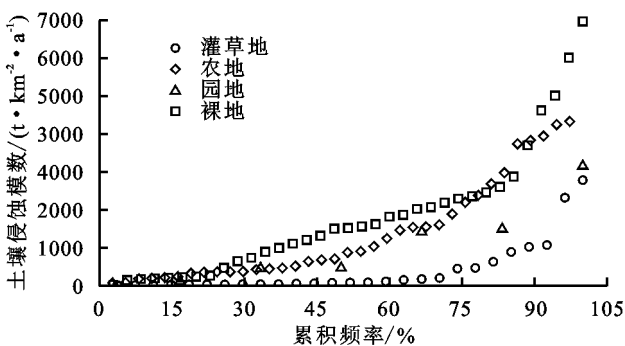


图 3 4 种主要土地利用类型实测土壤侵蚀模数的累积频率分布

2.3 不同土地利用土壤侵蚀危险程度结果

从表 3 可以看出,干热河谷各流域当地平均坡度下主要土地利用的土壤侵蚀模数均明显高于容许土壤流失量,各流域主要土地利用当地平均坡度下的土壤侵蚀模数所处等级均在 4~5,侵蚀量约为容许土壤流失量的 6~20 倍,充分说明当前干热河谷区各土地利用的土壤侵蚀状况仍相当严峻。从土地利用上看,农地和园地平均坡度下的土壤侵蚀模数所处等级比灌草地高出 1 个级别,侵蚀量约为容许土壤流失量的 10~20 倍,可见农地和园地的土壤侵蚀状况更严重。

3 讨论

本研究发现,不同土地利用类型的土壤侵蚀模数呈现出明显的差异,裸地侵蚀模数最高,其次是农地和园地,灌草地的土壤侵蚀模数最低。一般而言,裸地小区全年无植被覆盖且人为扰动最为强烈,因此其侵蚀模数最大;农地和园地较易受到人为干扰^[7],从而造成植被减少、径流增加,土壤易于脱离和搬运,加速土壤侵蚀^[62-63],而灌草地由于植被盖度较高且人为扰动较少,因此其土壤侵蚀模数相对较低。说明受人类扰动越强,相应土地利用的侵蚀越严重,这与以往研究的结果^[6-7,64]一致。考虑到干热河谷位于西南

土石山区,为进一步了解本文研究成果与区域整体成果的适应性,将本文不同土地利用土壤侵蚀模数和水土保持措施效益与西南地区相关成果进行对比。研究中当地坡长坡度下农地 $[17.49\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 和裸地 $[18.28\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 的土壤侵蚀模数,分别与西南土石山区农地的侵蚀模数 $[35.44\pm 27.64\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ ^[5]及 Zhao 等^[7]在类似地区报道的裸地的侵蚀模数 $[27.01\pm 4.70\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 相一致;以往的研究^[10]发现,西南土石山区梯田的减沙效益是 53%,云南地区植物篱减沙效益为 27.1%~67.6%^[65],也与本研究结果一致。相关对比充分说明,干热河谷作为西南土石山区的重要组成部分,与西南土石山区的土壤侵蚀规律具有内在统一性。

表 3 不同土地利用平均坡度下的土壤侵蚀模数

区域	土地利用类型	坡度/ (°)	$A_{\text{容}} /$ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	等级 $[T=150\text{ t}/$ ($\text{km}^2\cdot\text{a})]$
金沙江	灌草地	27.20 ± 12.69	1004.10	4
	农地	15.47 ± 9.88	1903.17	5
	园地	14.78 ± 10.35	1484.91	5
澜沧江	灌草地	29.82 ± 11.67	1101.44	4
	农地	22.79 ± 9.64	2932.08	5
	园地	21.08 ± 10.67	2219.11	5
礼社江	灌草地	28.15 ± 9.51	1039.83	4
	农地	16.71 ± 8.83	2080.58	5
	园地	23.03 ± 10.78	2441.18	5
绿汁江	灌草地	25.21 ± 10.24	928.32	4
	农地	16.03 ± 8.72	1983.75	5
	园地	15.99 ± 9.34	1627.35	5
怒江	灌草地	29.43 ± 12.08	1087.34	4
	农地	16.52 ± 10.17	2053.15	5
	园地	17.26 ± 9.43	1776.82	5
元江	灌草地	26.77 ± 10.86	987.93	4
	农地	18.26 ± 9.27	2300.68	5
	园地	15.65 ± 8.98	1586.89	5

注:1,2,3,4,5 分别代表 $<1T$ 、 $1\sim 2T$ 、 $2\sim T$ 、 $4\sim T$ 和 $>8T$ 等不同侵蚀等级。

本研究还发现,干热河谷各流域主要土地利用类型,尤其是农地和园地土壤侵蚀模数仍保持在较高水平,其侵蚀模数可达到容许流失量的 10~20 倍,土壤侵蚀模数均远大于容许土壤流失量,说明干热河谷地区农地和园地的土壤侵蚀状况仍十分严峻。杨子生等^[66]和 Rong 等^[67]研究发现,西南地区坡耕地、园地的土壤侵蚀对流域侵蚀的贡献极大,与本文的研究结果相近。一方面,坡耕地是水土流失的主要源地^[68],近年来不合理的耕作活动进一步加剧干热河谷地区坡耕地的土壤侵蚀^[69]。坡耕地的整治对改善干热河谷地区生态环境、促进当地经济社会的可持续发展具有十分重要的意义^[70],因此,后续需要进一步加强坡耕地土壤侵蚀治理工作。另一方面,为了利用光热资源增

加收入,当地开垦园地发展热作产业^[71],单一种植果、桑等经济林树种,如芒果、柑橘、甘蔗等,果树多栽培在较陡的坡地,加上不合理的果园管理措施导致园地土壤大面积裸露,加剧园地的土壤流失^[49]。因此,后续有必要加强对园地等土地利用类型的侵蚀状况的观测研究,以进一步加强对园地侵蚀的系统治理。

通过收集径流小区实测资料,本研究对于热河谷区主要土地利用的土壤侵蚀模数和水土保持措施效益进行评价,并取得可靠的结果。然而,本研究也存在着一定的局限性,主要体现在:(1)本文涉及的径流小区观测站点多集中在以元谋为主的金沙江干热河谷,而其他流域干热河谷区的站点数量相对不足,导致研究点位对于热河谷整体的代表性略有不足;(2)园地等土地利用类型的观测小区年数据量相对较少,一定程度上影响对园地土壤侵蚀的准确认识;(3)水土保持措施类型不够丰富,造成对水土保持效益的分析和评价仍有一定的局限性。基于上述不足,建议在后续的定位观测中,进一步加强径流小区观测点位的代表性和覆盖面,加强园地等典型土地利用类型和主要水土保持措施的定位观测,加长小区观测时段,从而为提高干热河谷地区水土流失预报的精确度提供数据支撑,为水土保持防治实践工作提供科学依据。

4 结 论

(1)干热河谷地区灌草地、农地、园地和裸地等主要土地利用类型当地实测土壤侵蚀模数分别 405.34, 1 748.58, 1 184.78, 1 827.47 t/(km² · a),标准坡长坡度条件下的土壤侵蚀模数分别为 110.88, 389.58, 320.66, 507.87 t/(km² · a),均呈现出裸地最大、农地和园地次之、灌草地最低的特点,表明受人类活动干扰较强的地区,土壤侵蚀往往更为严重。

(2)干热河谷地区封禁、水平阶整地、梯田和植物篱等水土保持措施均能较好发挥水土保持效益,平均可以减少 72% 的土壤侵蚀量。

(3)干热河谷各流域主要土地利用类型,特别是农地和园地在当地平均坡度下的土壤侵蚀模数均明显高于容许土壤流失量,侵蚀量约为容许土壤流失量的 10~20 倍,说明干热河谷地区主要土地利用的土壤侵蚀仍相当严峻。

参考文献:

[1] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
[2] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2021年)[EB/OL].(2021-12-03)[2022-09-26].<http://slgj.d.mwr.gov.cn/pdfview/2022-09-23/331.html>.
[3] Renschler C S, Harbor J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales: The role of geomorpho-

gists in land management research and implementation [J]. *Geomorphology*, 2002, 47(2/3/4): 189-209.
[4] Renard K G. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. Washington D C: U. S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, 1997.
[5] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data [J]. *Catena*, 2015, 124: 68-76.
[6] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2019, 43(3): 391-409.
[7] Zhao J, Wang Z, Dong Y, et al. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: e149665.
[8] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]. Beijing: 12th ISCO Conference, 2002: 21-25.
[9] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 753-760.
[10] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 173: 109-121.
[11] Arnqvist G, Wooster D. Meta-analysis: Synthesizing research findings in ecology and evolution [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, 10(6): 236-240.
[12] Koricheva J, Gurevitch J. Uses and misuses of meta-analysis in plant ecology [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(4): 828-844.
[13] 张荣祖,郑度,杨勤业,等.横断山区干旱河谷[M].北京:科学出版社,1992.
[14] 何周窃,苏正安,王勇,等.干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):8-13,27.
[15] 张宝军,熊东红,杨丹,等.跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J].土壤学报,2017,54(1):48-59.
[16] 纪中华,刘光华,段曰汤,等.金沙江干热河谷脆弱生态系统植被恢复及可持续生态农业模式[J].水土保持学报,2003,17(5):19-22.
[17] 纪中华,李建增,沙毓沧,等.元谋干热河谷退化坡地罗望子人工林水土保持效益[J].水土保持学报,2001,15(4):63-65,117.
[18] 方海东,潘志贤,岳学文,等.元谋干热河谷银合欢人工林水土保持功能研究[J].西南农业学报,2014b,27(1):387-390.
[19] 史亮涛,金杰,张明忠,等.云南干热河谷旱坡地南洋樱

- 植物篱水土保持效益研究[J].草原与草坪,2010,30(4):76-80.
- [20] 董莉,王克勤,陈志中.元谋干热河谷坡地水平阶整地的效益分析[J].中国水土保持,2011(10):7-9.
- [21] 王震洪,段昌群,文传浩,等.滇中三种人工林群落控制土壤侵蚀和改良土壤效应[J].水土保持通报,2001,21(2):23-27.
- [22] 陈奇伯,王克勤,刘芝芹,等.金沙江干热河谷封禁管护坡面的产流产沙特征[J].水土保持研究,2006,13(4):217-219.
- [23] 何周竊,苏正安,熊东红,等.金沙江干热河谷人工林土壤水分研究[J].山地学报,2018,36(5):731-739.
- [24] 田波,陈奇伯,王克勤.金沙江干热河谷不同处理坡面的产流产沙规律研究[J].西南林学院学报,2006,26(6):44-48.
- [25] 王建文,熊文森,刘安平,等.元谋干热河谷坡面造林整地截流减沙作用研究[J].西南林业大学学报,2011,31(6):31-35.
- [26] 张明忠,何光熊,方海东,等.元谋干热河谷优势乡土草群落水土保持效益研究[J].水土保持研究,2017,24(2):101-104.
- [27] 王洪,孔祥周,李易,等.金沙江干热河谷地区坡地水土流失直接经济损失评估[J].四川农业大学学报,2014,32(1):103-106.
- [28] 王建文,王克勤,任占远,等.元谋干热河谷坡面径流蓄积过程中的面源污染物变化[J].西南林业大学学报,2012,32(1):25-29.
- [29] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[J].水土保持通报,1999,19(1):1-9.
- [30] 刘海,陈奇伯,王克勤,等.金沙江干热河谷典型区段水土流失特征[J].水土保持学报,2012,26(5):28-33.
- [31] 游翔,张闻多,张素,等.攀枝花干热河谷区坡面产流产沙研究[J].中国水土保持,2020(6):28-30.
- [32] 孙辉,唐亚,陈克明,等.固氮植物篱防治坡耕地土壤侵蚀效果研究[J].水土保持通报,1999,19(6):1-5.
- [33] 南岭,郭芬芬,王小丹,等.云南元谋干热河谷区典型植被恢复模式的水土保持效应[J].安徽农业科学,2011,39(9):5168-5171,5225.
- [34] 王静,田波.金沙江干热河谷坡面水土流失系统动力学仿真模拟[J].水土保持通报,2008,28(1):95-98.
- [35] 龙会英,金杰,张德,等.豆科牧草和灌木在元谋干热河谷小流域综合治理的应用研究[J].水土保持研究,2010,17(2):254-258.
- [36] 方海东,潘志贤,岳学文,等.元谋干热河谷新银合欢林对降水截流的效应[J].热带生物学报,2014,5(2):147-152.
- [37] 刘光华,纪中华,沙毓沧,等.罗望子林人工植被系统对元谋干热河谷退化生态系统的治理效应研究[J].西部林业科学,2006,35(2):1-8.
- [38] 顾治家.红河流域土壤侵蚀时空分异研究[D].昆明:云南大学,2016.
- [39] 刘芝芹,王克勤,李艳梅.云南干热河谷不同坡面产流产沙研究[J].山西水土保持科技,2009(4):14-18.
- [40] 孟广涛,郎南军,方向京,等.滇中高原山地防护林体系水土保持效益研究[J].水土保持通报,2001,21(1):66-69.
- [41] 杨子生.云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J].山地学报,2002,20(增刊1):1-9.
- [42] 杨子生,刘彦随, Liang L H,等.金沙江下游近40年来土壤侵蚀变化:以云南彝良为例[J].山地学报,2005,23(2):144-152.
- [43] 刘海.金沙江干热河谷典型区段水土流失特征研究[D].昆明:西南林业大学,2012.
- [44] 杨洪舟,王艳丹,岳学文,等.扭黄茅+三芒草群落对干热河谷区雨后径流的再分配作用[J].中国水土保持,2021(10):60-63.
- [45] 王洪,孔祥周,张瑜,等.金沙江干热河谷地区降雨对水土流失的影响[J].西南林业大学学报,2014,34(4):70-74.
- [46] 肖理,王章文,殷庆元,等.金沙江干热河谷坡改梯对水土保持的影响[J].西南农业学报,2019,32(12):2856-2861.
- [47] 杨子生,谢应齐.滇东北坡耕地水土流失分析[J].中国农业资源与区划,1997(6):19-25.
- [48] 杨子生,梁洛辉,王云鹏.云南省金沙江流域水土流失基本特征分析[J].山地学报,2002,20(增刊1):10-17.
- [49] 胡斌,张瀚曰,李晓明,等.不同治理措施对坡地芒果园水土流失的治理效果[J].水土保持通报,2022,42(1):130-136.
- [50] 拜得珍,纪中华,杨艳鲜,等.银合欢冲沟治理水土保持效益研究[J].水土保持研究,2004,11(3):226-228.
- [51] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River[J].Ecological Engineering,2014,62:13-26.
- [52] Xu X L, Ma K M, Fu B J, et al. Soil and water erosion under different plant species in a semiarid river valley, SW China: The effects of plant morphology [J].Ecological Research,2009,24(1):37-46.
- [53] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- [54] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? [J].Earth-Science Reviews,2012,115(1/2):21-36.
- [55] Nearing M A. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(3):917-919.
- [56] Bagarello V, Ferro V, Giordano G. Testing alternative erosivity indices to predict event soil loss from bare plots in Southern Italy [J]. Hydrological Processes, 2010,24(6):789-797.
- [57] Nearing M A, Govers G, Norton L D. Variability in soil erosion data from replicated plots[J].Soil Science Society of America Journal,1999,63(6):1829-1835.