DOI: 10.20103/j.stxb.202503070501

黄梦思,金柏浩,周洪,阎建忠.西南高山峡谷区不同地带农家肥施用差异及其影响因素的多元分析.生态学报,2026,46(8): - .

Huang M S, Jin B H, Zhou H, Yan J Z.Multivariate analysis of the differences in the application of farmyard manure in different zones of the southwest mountainous and canyonous region and its influencing factors.Acta Ecologica Sinica,2026,46(8): - .

西南高山峡谷区不同地带农家肥施用差异及其影响因素的多元分析

黄梦思,金柏浩,周 洪,阎建忠*

西南大学资源环境学院,重庆 400716

摘要:西南高山峡谷区水土流失严重,是中国典型的生态环境脆弱区。农户是应对土壤侵蚀的主体,不同地带的农户如何根据土壤侵蚀强度施用农家肥,目前少有研究。基于农户调研数据和空间地理信息,本文分析了自然条件、农牧模式及社会经济因素对农家肥施用量的影响。结果表明,西南高山峡谷区农牧模式呈现显著地带差异;高山村侵蚀强度低,农户采用“放牧-回圈”模式,农家肥投入较低;高半山村以微度侵蚀为主,农户采用“暖季放牧+冬季补饲”模式,农家肥投入大;半山村侵蚀强度大,形成“暖季放牧+松针垫圈+补饲”模式,农家肥施肥量较高;河谷村微度侵蚀,受劳动力析出影响转向圈养,农家肥投入高。土壤侵蚀强度是农家肥施用的核心驱动因素,其等级每提升 1 级,施肥量增加显著,而农牧模式与劳动力、政策等社会经济因素对施肥量具有调节作用。本研究发现 4 个地带的农家肥施用差异是自然本底、农牧模式与侵蚀压力协同作用的结果,为区域水土流失治理提供了差异化施策依据。

关键词:西南高山峡谷区;农家肥;土壤侵蚀;地带性;地力资本

Multivariate analysis of the differences in the application of farmyard manure in different zones of the southwest mountainous and canyonous region and its influencing factors

HUANG Mengsi, JIN Bohao, ZHOU Hong, YAN Jianzhong*

College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716 ,*China*

Abstract: The mountainous and canyonous regions in Southwest China suffer from severe soil erosion and are typical areas with fragile ecological environment in the country. Households are the main actors in responding to soil erosion. However, there is little research on how households in different zones apply farmyard manure based on the intensity of soil erosion. Based on household survey data and spatial geographic information, this paper analyzed the impact of natural conditions, agricultural and pastoral models, and socio-economic factors on the application of farmyard manure. The results showed that agricultural and pastoral models in the mountainous and canyonous regions of Southwest China exhibited significant zonal differences. Households in high mountain villages, where soil erosion was low, adopted a “grazing-rotation” model and applied less farmyard manure. Households in high half-mountain villages, where erosion was mainly slight, adopted a “summer grazing+winter supplementary feeding” model and applied more farmyard manure. Households in half-mountain villages, where soil erosion was severe, adopted a “summer grazing+pine needle bedding+supplementary feeding” model and applied a relatively high amount of manure. Households in river valley villages, where erosion was slight, had shifted to

基金项目:国家重点研发计划(2022YFF1302904-04)

收稿日期:2025-03-07; **网络出版日期**:2026-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yanjzswu@126.com

penning due to labor outflow, but still maintained a high manure application habit. Soil erosion intensity was the core driving factor for the application of farmyard manure. For each increase in erosion intensity by one grade, the application of manure increased significantly. However, agricultural and pastoral models and socio-economic factors such as labor and policies have a moderating effect on this relationship. This study finds that the differences in farmyard manure application among the four zones are the result of the combined effect of natural background, agricultural and pastoral models, and erosion pressure, providing a basis for differentiated policies for regional soil and water loss control.

Key Words: the southwest mountainous and canyonous region; farmyard manure; soil erosion; zonality; landesque capital

土壤侵蚀是威胁全球农业可持续发展的核心环境问题之一,其导致的土壤退化和土地生产力下降直接威胁粮食安全与农户生计[1]。中国作为受土壤侵蚀影响最严重的国家之一,水土流失面积占国土总面积的37%[2—3]。西南高山峡谷区因高陡地形、强降水和岩溶地质,成为全国水土流失最剧烈的区域之一,强烈及以上侵蚀面积占比高出全国均值5个百分点[4]。尽管工程措施,如坡改梯、截水沟,以及生物措施,如植被恢复,在侵蚀治理中效果显著,但工程措施依赖政府长期投资[5—6]。农户作为应对土壤侵蚀的主体,其自主采用的耕作措施,如施用农家肥来应对土壤侵蚀,却少有研究。

国外学者通过对土壤侵蚀区域农户耕作措施的观察,提出地力资本的概念,即“通过人类劳动对土地的长期投资,能够显著增强土地生产力和可持续利用能力”[7]。土壤侵蚀每年都减损地力资本,当地力资本下降时,作物生长受限,农民生计受威胁,且可能加剧水土流失和土壤侵蚀的恶性循环。因此,农户需要通过采取各种措施应对地力资本的下降,或促进地力资本的增长,施用农家肥(厩肥)就是其中最重要的措施。农家肥是农业和畜牧业结合的重要产物[8],由作物秸秆和动物粪便等农业废弃物经自然堆积发酵形成,不仅提高土壤氮含量和粮食产量[9],还能改善土壤特性,防止土地退化[10]。尤其在退化土壤和易受侵蚀地区,农家肥在恢复和维持土壤肥力方面效果显著[11—12]。鉴于土壤侵蚀在很大程度上受地带性差异影响,包括降雨[13]、土壤、坡长[14]及坡度[15]等因素,不同地带的土壤侵蚀程度存在显著差异,从而导致农家肥施用量也有所不同。此外,这些地带差异性还促使各地区形成了不同的农牧业结合模式[16]。这些不同的农牧业结合模式不仅体现了资源的循环利用,同时也直接决定了农家肥的供应量、施用频率和效果,这使得各地的农业生产对农家肥的依赖程度和使用方式存在显著差异[8]。

已有研究表明,土壤侵蚀与农家肥的施用呈现明显的正相关关系[17],但仍存在三方面关键局限:首先,土壤侵蚀的地带性差异如何通过农牧模式分异间接影响农家肥施用策略尚不明确;其次,除侵蚀强度外,社会经济因素(如农业劳动力数量、政府补贴等)是否对农家肥施用与土壤侵蚀的关系具有调节作用仍需验证;最后,农户如何通过整合作物—牲畜系统动态响应不同地带的土壤侵蚀缺乏系统解析。

西南高山峡谷区的垂直地带性为解析多元驱动机制提供了典型区。该区依据海拔梯度划分为4个差异显著的地带,其“气候—土壤—农牧模式”的分异特征,使得不同地带农户的农家肥施用行为呈现明显差异,为揭示环境本底、模式选择、施肥行为之间的层级关联提供了理想研究载体。基于在西南高山峡谷区四个不同地带(河谷村、半山村、高半山村以及高山村)调研的567份有效问卷,本文对该区域各个地带农业和畜牧业的结合模式进行定性分析,并采用多元线性回归模型研究了土壤侵蚀程度与农家肥施用量的关系。本文的研究目标是:(1)认识西南高山峡谷区不同地带农业与畜牧业的结合模式以及农家肥施用情况;(2)揭示西南高山峡谷区不同地带农家肥施用和土壤侵蚀的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南高山峡谷区(25°—33°N,91°—105°E),面积约为61.10万 km^2,位于西藏、四川、云南三省(自治区)

交界地带。该区地势高峻,岭谷高差达 7201 m,谷坡陡峭,河谷深切狭窄,地貌类型主要为高山和中山。其气候类型属于亚热带及热带季风气候,垂直地带性差异明显;降水充沛集中,夏季多暴雨,年降水量 406.29—1497.88 mm,呈现南多北少、东多西少分布。同时,西南高山峡谷区地形陡峭崎岖,土层浅薄,土壤保水性差,强降水冲刷导致土地石漠化严重,水土流失和土壤侵蚀问题尤为突出,使得生态环境十分脆弱[4]。并且由于该区域具有高陡地形、岩溶地质[18]条件和普遍存在的陡坡耕种方式,使其土壤侵蚀特征有别于其他地区。此外,西南高山峡谷区由于其岭谷高差极为悬殊,气候分异明显,水热组合多样、侵蚀类型复杂,呈现“地带性”垂直分异特征[19],自下而上可划分为三级垂直地带。海拔 2000 m 以下为“中低山河谷带”,居民以汉族为主,土地集约化程度高,以经济林果与农业集约经营为主,土壤侵蚀为水蚀类型。海拔 2000—3500 m 为“中山带”,聚集了白、普米、傈僳、怒、彝、傣、藏等近 30 个少数民族(占总人口 80%),以坡耕地为主,陡坡地形与局地气候加剧水土流失,土壤侵蚀以水蚀为主。海拔 3500 m 以上为“高山带”,农业耕种程度低,以林农、牧农活动为主,属水蚀与冻融复合侵蚀区。研究区的垂直地带性不仅决定了“气候-土壤-植被”梯度,还催生了差异化的农牧模式:高山带依托丰富的林草资源形成了“放牧-休耕-自然积肥”循环;中山带因强侵蚀压力发展出“暖季放牧+冬季补饲+松针垫圈”的人工积肥策略;河谷带则因劳动力析出转向“圈养+经济作物”模式,但延续了高量施肥习惯。这种“环境分异-模式选择-施肥策略”的关联机制,既体现了农户对土壤侵蚀的响应,也揭示了地力资本维持依赖于农家肥投入。近年来,为了预防和治理水土流失,减少土壤侵蚀,国家采取了一系列措施,包括投入大量资金实施退耕还林还草工程、天然林保护工程等六大林业工程[20—21],并根据水土保持区划划分 5 个三级区进行水土保持功能定位,分区分类协同治理等[22]。这些措施使西南高山峡谷区的水土流失综合治理取得明显成效。但农户层面的耕作措施(如农家肥的施用),仍是应对土壤侵蚀的重要措施。从农牧业的发展情况来看,该区不同地带形成了不同的农牧结合模式,农户通过施用农家肥来提高地力资本,不仅增强了土壤肥力,还能提高土壤的抗蚀性,减轻土壤侵蚀程度[23—24]。本研究聚焦不同地带的农牧模式与农家肥施用差异,旨在为该区的生态治理与可持续发展提供科学依据。

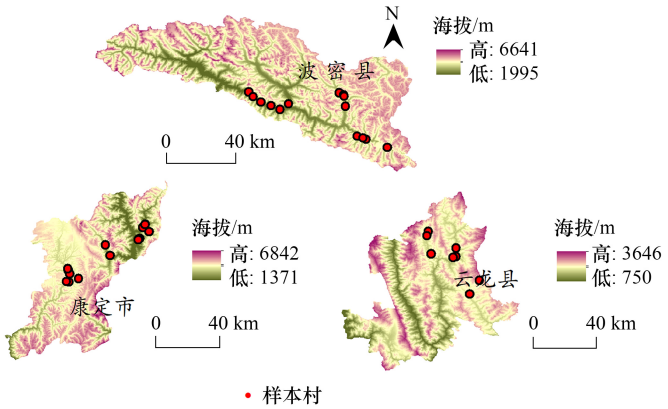

图 1　研究区地理位置

Fig.1　The location of study area

1.2　数据来源

本研究数据源于 2023 年 7—8 月在西藏自治区波密县、云南省云龙县、四川省康定市开展的半结构化问卷调查数据。

在样本选取流程方面,本研究结合自然条件、社会经济及农牧业特征选取了 3 个样本县,进一步从中选取波密县古乡、多吉乡、玉普乡,云龙县检槽乡、关坪乡、长新乡及康定市呷巴乡、甲根坝镇、雅拉乡、金汤乡和麦崩乡共 12 个样本乡镇,随机抽取 40 个村。最终调查了 571 户农户,获得 567 份有效问卷(其中河谷村 59 份、半山村 181 份、高半山村 278 份以及高山村 49 份)。

在数据采集方法方面,本研究通过开展 13 次镇级座谈会、40 次村级座谈会掌握当地气候、种植、养殖及水土流失状况,并对户主开展了户均时长 2 小时的半结构式访谈,内容涵盖家庭特征、农地利用、肥料投入、收入结构等。

在质量控制措施方面,本研究通过多重手段确保数据可靠性:所有参与调研的调查员在正式调查前接受专门培训,在西藏地区调研时另聘 2 名藏族大学生担任翻译并进行专项培训;同时采用各县通用的"高山-高半山-半山-河谷"分类体系,该体系综合考虑了海拔、气候、植被、土地利用等因素。在每一个村进行了村级访谈和讨论,获得了该村在劳动力转移、土地利用、作物品种、牲畜养殖、农家肥投入、收入等方面的基准数据。为进一步保障数据质量,本研究针对问卷数据开展系统清洗工作,即通过规范流程剔除无效样本,确保数据的准确性与逻辑性,具体包括:剔除缺失农家肥施用量、土壤侵蚀程度、家庭劳动力数量等核心变量的问卷;排查并移除种植面积大于承包地面积、牲畜饲养量与秸秆消耗量明显不匹配等违背农业生产实际逻辑的样本;对异常值进行识别与处理,结合实地调研情况判断数据合理性,最终获得 567 份有效问卷,为研究结论的科学性提供了数据支撑。

在空间数据支撑方面,本研究使用了 DEM 和土壤侵蚀数据。DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),分辨率 30m×30m;土壤侵蚀数据由国家水土保持监测总站提供,数据为 1km×1km 栅格,利用 ArcGIS 叠加行政范围图后,得到每个村的水力侵蚀程度。西南高山峡谷区各典型村水力侵蚀程度如表 1 所示。

表 1 西南高山峡谷区各典型村水力侵蚀程度

Table 1 Degree of water erosion in typical villages of the southwest mountainous and canyonous region

地理属性 Geographical attribute	县 County	乡镇 Township	村 Village	侵蚀程度 Erosion degree	地理属性 Geographical attribute	县 County	乡镇 Township	村 Village	侵蚀程度 Erosion degree
河谷村	康定市	金汤镇	老五大寺村	11				达巴村	11
			寇家河坝村	11				阿西村	12
		雅拉乡	蒙庆村	11			古乡	巴卡村	11
半山村	康定市	金汤镇	汤坝村	13				嘎朗村	11
			新五大寺村	13				古村	11
	云龙县	检槽乡	检槽村	14				索通村	11
			炼登村	13				松饶村	11
			师井村	11				雪瓦卡村	11
		长新乡	包罗村	11			多吉乡	扩拉村	11
			佳局村	13				西巴村	11
			松炼村	11				木古村	11
高半山村	康定市	雅拉乡	王母村	11				毛江村	11
			中古村	11	高山村	康定市	甲根坝镇	日欧村	11
		麦崩乡	厂马村	11				日泽村	11
			瓜达村	12				夺让村	11
			下火地村	12				阿加上村	11
	云龙县	关坪乡	关坪村	11			呷巴乡	呷巴下村	12
			胜利村	14				立启村	11
	波密县	玉普乡	米美村	11				铁索村	11
			格巴村	11				司车村	11

侵蚀程度含义:11=微度侵蚀;12=轻度侵蚀;13=中度侵蚀;14=强烈侵蚀

1.3 定性分析

本研究基于在西南高山峡谷区四个不同地带调研的 567 份有效问卷(河谷村 59 份、半山村 181 份、高半山村 278 份以及高山村 49 份),采用均值法对不同地带的承包耕地面积、种植耕地、作物种植面积、秸秆数量、

牲畜养殖数量以及农家肥产量和施用量等进行分析,并对不同地带农业和畜牧业的结合模式进行定性描述,最后揭示不同地带土壤侵蚀程度与农家肥施用量之间的关系。

1.4　定量模型

1.4.1　变量选取

因变量:农家肥的施用不仅对环境友好,对土壤速效养分及腐殖酸变化起缓冲作用,而且可以增加土壤中大团粒的比例和水稳性团聚体的直径[23—25],而水稳性团聚体的增加可以很好地提高土壤的抗蚀性,减少土壤侵蚀[17]。因此,本文根据调查问卷中农户实际施用农家肥的情况,选择单位面积农家肥的施用量作为因变量。

自变量:农户农家肥施用不仅决定于侵蚀强度,还取决于个人或家庭内部因素、海拔、资源条件和政策因素。由于农家肥的施用可以减少土壤侵蚀,提高土壤抗蚀性,因此,农户会根据土壤侵蚀程度决定农家肥的施用量,在土壤侵蚀强烈的地带,农家肥施用多,而在土壤侵蚀弱的地带,农家肥施用就少[26]。在个体特征方面,有研究表明,农户年龄和受教育程度会影响农家肥的施用行为,通常来说,农户年龄越大、受教育程度越高,施用农家肥的可能性越大[27—28]。在家庭特征方面,家庭收入等经济资本和家庭劳动力数量等人力资本均会影响农户的农家肥施用[29]。从资源条件来看,有研究表明,农户耕地块数、种植作物种类数、土壤肥力、牲畜养殖情况等对农家肥施用也有影响[30]。在政策环境方面,一般来说,政府补贴以及农业部门针对农业施肥技术进行指导对农户农家肥的施用会带来积极的影响[31—32]。因此,本文基于调查问卷的实际情况和调查区域的自然条件,选取自然条件(海拔高度、土壤水力侵蚀程度)、户主特征(户主年龄、户主受教育程度)、家庭特征(非农收入、农业劳动力、非农劳动力)、资源条件(种植耕地面积、种植作物种类数、牲畜饲养量、土地质量)以及政府支持(政府补贴)五个方面的 12 个指标作为自变量。

1.4.2　数据处理

本研究选择多元线性回归模型探究各自变量对农户农家肥投入的影响,在进行模型运行之前,由于指标单位面积农家肥投入量、非农收入、政府补贴以及海拔高度数据量级差异较大,因此对其进行取对数处理,回归模型的表达式如下:

$$y_t=\beta_0+\beta_1 x_{1t}+\cdots+\beta_k x_{kt}+\mu_t \tag{1}$$

式中:y_t为 2022 年每户单位面积农家肥投入量;β_0为常数项;β_k为回归系数;x_{kt}为自变量;μ_t为随机误差项。在进行计量回归之前,通过皮尔逊相关系数(PCC)、方差膨胀因子(VIF)以及容忍度(T)对各变量之间进行多重共线性检验。全区回归模型中 PCC 最大值为 0.66;VIF 最大值为 1.90;T 最小值为 0.53,均满足 PPC<0.8,VIF<10,T>0.1,各变量之间不存在多重共线性的问题。

2　结果与分析

2.1　不同地带农牧模式及农家肥施用情况

2.1.1　高山村和高半山村

高山村:侵蚀强度低,农家肥投入少。高山村多位于海拔 3500 m 以上的山原地带,海拔高,地势平坦。高山村的年平均降水量为 783.30 mm,土壤类型主要为淋溶土和半水成土。土壤侵蚀数据表明,侵蚀程度多为微度侵蚀,仅一个村为轻度侵蚀。农户调查也表明,有 26.5%的样本农户表示有土壤侵蚀。高山村农户承包地面积较大,户均 1.94 hm^2,2022 年户均种植面积达 1.18 hm^2。当地有休耕传统,每年让部分耕地休耕以恢复地力。受海拔和气候影响,农户主要种植青稞(0.72 hm^2)、小麦(0.16 hm^2)和土豆(0.09 hm^2)等传统作物,其中青稞和小麦不仅为农牧民提供粮食,其秸秆还可作为牲畜冬季饲料,因此每户均建有草料棚,户均秸秆使用量达 17336.74 kg。8 月青稞收割后,农户保留作物残茬并将牲畜赶至田间放牧,通过牲畜粪便自然为耕地补充肥料,这一做法与非洲部分地区的自然还田模式类似[33—34]。2022 年平均每户养殖牲畜 13.74 头(牲畜数量均折算牛单位,1 头牛=1 匹马=3 只羊=3 头猪),以牛为主。这些牛主要为农牧民提供牛奶和牛粪,随着机

械化普及已不再作为畜力使用,且多被农户作为生产资料保留,较少售卖或屠宰。因林草资源丰富,农牧民采用“白天草场放牧、夜间回圈”的养殖模式,既便于挤奶,也利于收集牛粪。尽管户均农家肥产量较高(2740.82 kg/户),但因耕地面积较多,单位面积施用量较低,仅 2314.88 kg/hm^2(图 2)。此外,高海拔村庄部分农户将牛粪作为燃料使用。综上,高山村的低侵蚀程度与低农家肥投入形成对应关系。

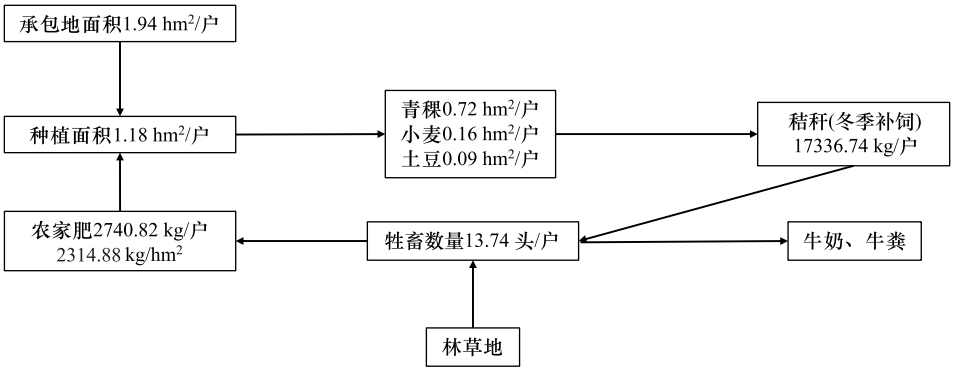

图 2 高山村农业和畜牧业结合循环模式图

Fig.2 Combined cycle model diagram of agriculture and animal husbandry in gaoshan village

高半山村:以微度侵蚀为主,农家肥投入少。高半山村位于海拔 3000 m 以上的山体上部向山原的过渡地带,海拔较高且地势陡峭,耕地多分布于平坦台地。年平均降水量为 819.82 mm,土壤类型以淋溶土、半淋溶土以及初育土为主。土壤侵蚀数据显示,其侵蚀强度以微度侵蚀为主,有 3 个村为轻度侵蚀,1 个村为强烈侵蚀。农户调研数据表明,26.6%的样本农户认为其耕地存在土壤侵蚀。高半山村农户承包地面积多,户均 1.00 hm^{2}耕地,2022 年户均种植面积 0.87 hm^2。高半山村农户种植青稞(0.28 hm^2),小麦(0.24 hm^2),玉米(0.13 hm^2),也种植土豆(0.04 hm^2)等传统作物。户均秸秆使用量 33359.57 kg,除作为冬季饲料外,还广泛用于垫圈以促进牲畜粪尿与秸秆混合发酵。因气候适宜,当地休耕面积较少。高半山村牲畜养殖以牛为主,2022 年户均养殖 6.39 头,养殖模式随季节调整:春夏在周边林地、草地放牧,秋冬青稞与小麦收割后赶入耕地,冬季以秸秆补饲。农户根据需求灵活养殖牦牛与奶牛,其中牦牛全年 8 个月野外放牧、冬季回圈补饲,奶牛则每日回圈挤奶。受养殖规模限制,户均农家肥产量较低(1535.92 kg),单位面积施用量 1758.69 kg/hm^2(图 3),体现出低侵蚀程度与低农家肥投入的对应关系。

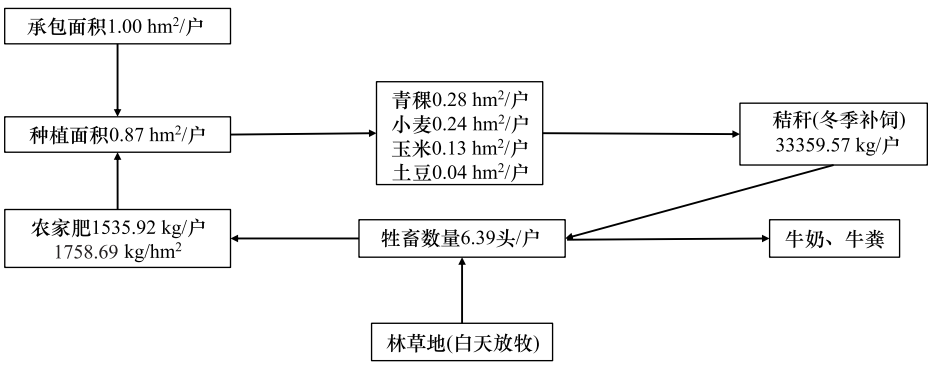

图 3 高半山村农业和畜牧业结合循环模式图

Fig.3 Combined cycle model diagram of agriculture and animal husbandry in gaobanshan village

2.1.2 半山村:侵蚀增强,农家肥投入量大

半山村位于海拔 2000—3000 m 的半山地带,年平均降水量达 1009.38 mm,坡度较大,土壤类型以半淋溶

土、初育土以及水成土为主,侵蚀较强。土壤侵蚀数据表明,侵蚀强度一半以上为强度侵蚀。农户调查表明,42.5%的样本农户认为其耕地发生了土壤侵蚀。半山村户均承包地 0.69 hm^2,2022 年户均种植 0.58 hm^2,主要种植玉米(0.46 hm^2)、土豆(0.01 hm^2)等传统作物,其余耕地多种植花椒和核桃。玉米秸秆主要用于冬季牲畜饲料及垫圈,户均秸秆使用量 7366.91 kg。牲畜养殖以牛为主,2022 年户均养殖 8.01 头。养殖规模较 2002 年增长 28.99%,其中饲养量 60 头以上的规模户共 5 户(以生猪和山羊为主,主要用于销售);户均年销售牲畜 1.18 头,自食 0.62 头。依托丰富的林草资源,当地采用"暖季草场放牧+冷季玉米秸秆补饲"的养殖模式(图 4),农家肥由作物秸秆与动物粪便混合发酵而成。云龙县半山村土壤侵蚀严重,牲畜饲养量增加而作物种植减少,秸秆不足,农户年均收集松针 1886.70 kg 补充垫圈,与牛粪混合发酵生产农家肥。半山村农家肥户均施用量 3538.81 kg,单位面积施用量达 6129.58 kg/hm^2,施用水平较高。

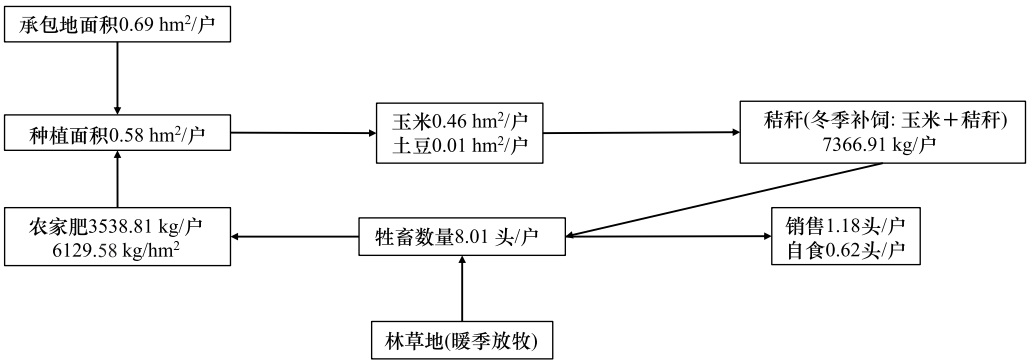

图 4　半山村农业和畜牧业结合循环模式图

Fig.4　Combined cycle model diagram of agriculture and animal husbandry in banshan village

2.1.3　河谷村:侵蚀减弱,农家肥使用多

河谷村位于海拔 2000 m 以下的河谷阶地,坡度较大但侵蚀程度较轻,土壤侵蚀数据显示均为微度侵蚀;农户调查显示,40%的样本农户认为耕地存在土壤侵蚀。该区年降水量 822.16 mm,土壤类型以淋溶土、半淋溶土及初育土为主。河谷村户均承包地面积较少(0.29 hm^2),2022 年户均种植粮食作物 0.15 hm^2,包括玉米(0.07 hm^2)、土豆(0.04 hm^2);受劳动力析出影响,耕地逐步转向种植水果、药材、花椒等经济作物,户均 0.03 hm^2。秸秆户均产量 7664.92 kg,主要用于垫圈和薪柴。牲畜养殖以圈养生猪为主,2022 年户均养殖 3.04 头,自食 0.18 头。因林草资源缺乏,当地长期采用圈养模式。近年来,劳动力析出导致农业劳动力户均减少 1.37 人,2022 年牲畜饲养量较 2002 年下降 28.64%,农牧业连接逐渐解体(图 5)。尽管农家肥户均施用量较少(962.38 kg),但因耕地面积小,单位面积施用量达 6415.87 kg/hm^2。

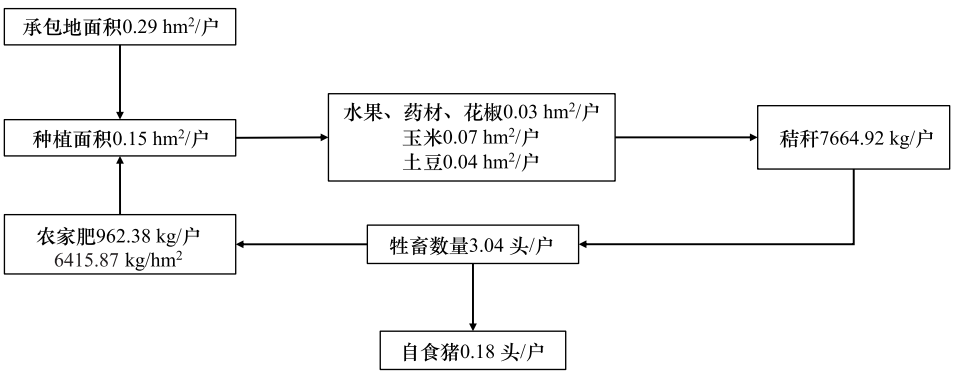

图 5　河谷村农业和畜牧业结合循环模式图

Fig.5　Combined cycle model diagram of agriculture and animal husbandry in hegu village

2.1.4 不同地带农牧模式与施肥策略的关联

西南高山峡谷区 4 个地带的农家肥施用差异是自然本底、农牧模式与侵蚀压力协同作用的结果(表 2)。高山村与高半山村因高海拔冷凉气候和丰富草场资源,形成以放牧为主的农牧循环模式:前者采用“白天放牧+夜间回圈”,依托青稞地放牧实现自然还田,后者通过“暖季放牧+冬季补饲”,实现了秸秆的高效利用。两地均以微度侵蚀为主,地力消耗有限,农家肥投入分别为 2314.88 kg/hm^{2}和 1758.69 kg/hm^2,显著低于侵蚀较重区域。

半山村地处 2000—3000 m 的水热集中带,强烈侵蚀导致地力快速流失,农户通过“暖季放牧+冬季补饲+松针垫圈”的复合模式扩大养殖规模(8.01 头/户),农家肥施用量达 6129.58 kg/hm^2,成为四地带中应对侵蚀的典型模式。河谷村虽侵蚀程度与高山村相近,且劳动力析出导致农牧业联系弱化,但由于其一年种植两季作物(小麦+玉米),农家肥施用量较高(6415.87 kg/hm^2)。

从驱动机制看,自然本底差异直接决定农牧模式类型——高海拔地带以放牧型循环为主,低海拔地带因耕地破碎化转向耕牧结合或经济作物种植;模式特征进一步影响肥料供需效率——放牧模式依赖自然循环,圈养模式需人工干预积肥;侵蚀压力则强化施肥策略的适应性分化:强侵蚀区通过“增畜+集材”主动增肥,轻侵蚀区更多受历史习惯或耕地集约化程度支配。这种“本底-模式-策略”的层级关联,既验证了土壤侵蚀与施肥量的正相关关系,也揭示了劳动力、政策等非自然因素对农户行为的复杂调节作用。

表 2 不同地带核心特征对比

Table 2 Comparison of core characteristics across different zones

地带 Zone	侵蚀程度 Erosion degree	核心农牧模式 Core agropastoral model	施肥策略驱动逻辑 Driving logic of fertilization strategy
高山村	微度	白天放牧+夜间回圈	低侵蚀+休耕,农家肥投入少
高半山村	微度	暖季放牧+冬季补饲	低侵蚀+秸秆利用,农家肥投入少
半山村	中度/强烈	暖季放牧+松针垫圈+补饲	强侵蚀+扩大养殖规模+松针垫圈,农家肥投入量大
河谷村	微度	圈养+经济作物	低侵蚀+高复种指数,农家肥投入量大

2.2 不同地带农家肥投入量的驱动因素分析

2.2.1 变量选择与描述性统计特征

本研究选取自然条件、户主特征、家庭特征、资源条件及政府支持五类共 12 个指标作为自变量,以农户单位面积农家肥施用量为因变量,以揭示不同地带施用差异的驱动机制。各变量的描述性统计结果见表 3。

从统计结果看,研究区海拔高度差异显著,反映出垂直地带性特征,高海拔地带因气候冷凉、植被覆盖度高,土壤侵蚀以微度为主,而低海拔河谷带虽侵蚀较轻,但历史陡坡耕种导致地力退化,农户延续高量施肥习惯。土壤侵蚀程度平均值接近轻度侵蚀,但不同地带差异显著,半山村所在的中山带侵蚀强度最高,农户需通过增加牲畜饲养量和收集松针积肥应对土壤侵蚀。户主年龄平均 51.25 岁且受教育程度以小学为主,显示出农户群体老龄化与低教育水平特征,可能限制对新技术的接受能力,但施肥行为仍表现出对侵蚀强度的适应性。

家庭特征方面,非农收入标准差较大,表明区域经济发展不均衡,河谷村因工业化程度高,非农就业机会多,农业劳动力减少导致牲畜饲养量下降,农牧业系统解体。农业劳动力充足的家庭更倾向于采用劳动密集型的农家肥施用方式,半山村农业劳动力占比高,其农家肥单位面积投入量显著高于其他地带。资源条件中,牲畜饲养量标准差达 14.04,与农牧模式地带性高度相关,高山村和半山村养殖规模大,粪肥供给充足,而河谷村因圈养为主且劳动力不足,粪肥总量有限;种植作物种类数平均 2.35 种,多样性低可能限制农家肥养分多样性。政府补贴平均值较高但标准差极大,表明政策支持力度不均,高补贴区域可能通过“草场补贴-养殖规模-粪肥还田”链条间接促进农家肥施用。

表 3　变量的描述性统计

Table 3　Descriptive statistics of variables

变量类型 Variable type	变量/单位 Variable/unit	变量说明 Variable description	均值 Mean	标准差 Standard deviation
自然条件	海拔高度/m	通过 GPS 定位的各村庄海拔高度	2499.33	15709.40
Natural conditions	土壤侵蚀程度	11=微度侵蚀, 12=轻度侵蚀, 13=中度侵蚀, 14=强烈侵蚀	1.63	1.03
户主特征	户主年龄/岁	每户户主的年龄	51.25	11.25
Household head characteristics	户主文化程度	1=文盲, 2=小学, 3=初中, 4=高(职)中, 5=大专及以上	2.83	0.27
家庭特征	非农收入/元	每户每月外出务工收入之和	43924.88	71804.23
Household characteristics	农业劳动力/人	家庭参与农业劳动的人数	2.26	1.35
	非农劳动力/人	家庭参与非农劳动的人数	1.17	1.21
资源条件	种植耕地面积/hm^2	家庭种植作物的总面积	0.73	0.76
Resource conditions	种植作物种类数	每户农户种植作物的种类数目	2.35	2.76
	牲畜饲养量/头	只考虑牛、马、羊、猪,且均以牛作为单位,转化方式为 1 头牛=1 匹马=3 只羊=3 头猪	7.83	14.04
	土地质量	1=高等质量,2=中等偏上质量,3=中等质量,4=中等偏下质量,5=低等质量	2.66	0.86
政府支持 Government support	政府补贴/元	主要包括种植补贴、草场补贴、林业补助以及其他养老金、低保,贫困补助等	9905.22	15709.40

2.2.2　多元回归模型结果与影响因素分析

利用 Stata 15.0 软件估计了西南高山峡谷区各因素对农家肥施用的影响,结果见表 4。

表 4　西南高山峡谷区每户单位面积农家肥投入量影响因素模型估计结果

Table 4　Model estimation results of factors affecting farmyard manure input per household per unit area in the southwest mountainous and canyonous region

指标类型 Indicator type	指标 Indicator	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error
自然条件	海拔高度/m(x_1)	−0.544	0.357
Natural conditions	土壤水力侵蚀程度(x_2)	0.362***	0.119
户主特征	户主年龄/岁(x_3)	0.001	0.011
Household head characteristics	户主受教育程度(x_4)	0.231**	0.100
家庭特征	非农收入/元(x_5)	0.033	0.030
Household characteristics	农业劳动力/人(x_6)	0.524***	0.093
	非农劳动力/人(x_7)	0.025	0.126
资源条件	种植耕地面积/hm^2(x_8)	−0.004	0.001
Resource conditions	种植作物种类数(x_9)	0.151*	0.085
	牲畜饲养量/头(x_{10})	0.032***	0.008
	土地质量(x_{11})	0.381***	0.136
政府支持 Government support	政府补贴/元(x_{12})	0.106*	0.054
常数项		3.505	2.989
R^2		0.1452	

*, **, *** 分别表示在 10%,5%,1%的统计水平上显著

回归结果表明,土壤水力侵蚀程度在 1%的水平上对农家肥施用具有显著的正向影响。具体而言,土壤侵蚀程度每提升一个等级,农家肥施用量平均增加 36.2%,这意味着土壤侵蚀问题越突出的农户,会投入越多的农家肥以应对地力衰退。在户主特征方面,户主受教育程度在 5%的统计水平上对西南高山峡谷区农家肥

施用具有显著的正向影响。一般来说,农户受教育程度反映了农户的个人素质和对新技术的接受能力,受教育程度越高,越能够正向促进农家肥的施用行为,这与朱利群[27]、王恒[28]等的研究结果一致。在家庭特征方面,农业劳动力人数对西南高山峡谷区农家肥施用具有显著的正向影响,且在1%的水平下显著,而非农收入和非农劳动力人数则对农家肥施用影响不显著。这可能是因为农业劳动力较多的农户家庭,其对农业生产的劳动力投入就越丰富,越倾向于采用以农家肥为核心的绿色农业技术,且每增加一个单位的农业劳动力,农户将多施用52.4%的农家肥。从资源条件来看,种植耕地面积对农家肥施用影响不显著,而种植作物种类数、牲畜饲养量以及土地质量均对西南高山峡谷区农家肥施用产生了显著的正向影响。其中,种植作物种类数在10%的水平上显著,牲畜饲养量以及土地质量均在1%的水平上显著。种植作物种类数每增加一单位,农家肥施用将提升15.1%;牲畜饲养量和土地质量每增加一单位,农家肥施用将分别提高3.2%和38.1%。从政府支持方面来看,政府补贴在10%的水平上对农户农家肥的施用产生显著的正向影响,这表明政府补贴降低了农户施用农家肥的成本和风险,因而对农户施用农家肥会产生激励作用。可见,土壤侵蚀程度越大、户主受教育程度越高、农业劳动力人数越多、种植作物种类数越多、牲畜饲养量越大、土地质量越好以及政府补贴越多,对农家肥施用的促进作用就会越大。

3 讨论

3.1 农家肥施用与土壤侵蚀强度的关系

在西南高山峡谷区,随着土壤侵蚀程度的增强,农户对农家肥的施用量也随之增加。这一现象与Mikha、Gil、Benjamin等[17,35—36]在其他侵蚀区域的研究结论具有一致性。有研究表明,在美国堪萨斯州海斯农业研究中心附近的严重侵蚀土地上,于2006年至2011年持续施用不同剂量的牛粪,可显著改善土壤养分动态,增加地力资本并减轻土壤侵蚀程度[17]。研究还指出,土壤特性,如土壤有机质、肥力等的增加均与农家肥的施用率增加有关,土壤有机质的数量以及肥力的大小直接影响土地的地力资本,而在被严重侵蚀的土地中,只有施用更多的农家肥才能使其地力资本恢复到原有的状态[17]。还有研究指出,农家肥的施用可以降低被侵蚀土壤的pH值,增加土壤肥力,而在被严重侵蚀的土壤中,则需要施用更高剂量的农家肥以增加侵蚀土壤的养分浓度,减少侵蚀,增强地力资本[32]。在印度和尼泊尔的山区亦是如此,Singh等[10]指出,在印度喜马拉雅山区土壤侵蚀强度较高的土地中分别施用低剂量和高剂量(低剂量的2倍)的农家肥,发现高剂量的农家肥施用可以明显改善土壤侵蚀的状态,增强地力资本。Tiwari等[37]也发现,在尼泊尔土壤被侵蚀的中山地区,与传统剂量相比,双倍剂量农家肥的施用更能够有效维持土壤肥力,减少土壤侵蚀。由此可知,农家肥施用作为一种提高土壤肥力的方法,在应对土壤侵蚀中的作用是极其显著的。

3.2 地带差异性对农家肥施用的影响

不同地带的自然条件与社会经济背景存在差异,导致了农家肥施用量的显著不同。高山村和高半山村天然牧草资源丰富[38]、植被覆盖度高、且水土流失程度较轻。此外,结合前文2.1可知,高山村位于山原地带,地势平坦;高半山村虽地势陡峭,但耕地多建于平坦台地上,土壤侵蚀程度相对较轻,因此农家肥投入较少。相比之下,半山村由于牧草资源缺乏、植被覆盖度低、地势陡峭且平地少,耕地多分布于陡坡,土壤侵蚀强度较高,因而需要投入更多农家肥以维持地力资本[39]。而对于河谷村,尽管其当前土壤侵蚀程度较低(问卷调查显示,89.8%的农户认为与二十年前相比,其耕地水土流失减少或未发生),但由于实行一年两季的耕作制度,对土壤养分消耗大,故单位面积农家肥投入量依然较高。这表明河谷村的水土流失与土壤侵蚀问题已得到显著改善。

3.3 劳动力析出对农家肥施用的影响

随着城市化进程加快,农村劳动力析出现象日益普遍,对农家肥施用产生了深远影响。一方面,劳动力析出会造成农业劳动力短缺,同时非农收入的提高增加了牲畜养殖的机会成本,致使农户养殖意愿下降、饲养量锐减[40]。这一现象在西南高山峡谷区的河谷村尤为典型:河谷村自然资源禀赋较差,但经济发展水平较高,

工业化与城市化提供了大量非农就业机会。为提升家庭生活水平,农户普遍选择非农就业,导致劳动力持续析出。据统计,2022 年河谷村户均农业劳动力减少约 1.4 人。同时,较高的非农收入显著推高了农业生产的机会成本,致使该村牲畜饲养量大幅下降。问卷调查表明,2022 年河谷村牲畜饲养量较 2002 年下降了 28.64%,养殖业的萎缩直接导致了农家肥施用量下降。另一方面,作为核心生产要素,劳动力析出会直接造成农地利用方式的变化[41],例如耕地撂荒或转作他用[42]。本研究的实地调查印证了这一规律:在河谷村,部分农户为在外出务工期间减少耕地撂荒,倾向于转种果木、药材及花椒等生长周期长、无需长期精细管理和大量农家肥投入的经济作物。近年来,这已逐渐发展为该村农户获取稳定收入的一种模式。据统计,2022 年河谷村果木药材等经济作物种植面积为 0.03 hm^2/户,占户均种植总面积的 18.83%。这种转变也导致河谷村农业和畜牧业逐渐解体,农业和林业逐渐发生耦合。因此,在一定程度上,由劳动力析出导致的牲畜饲养量下降和经济作物种植的增加促使了农畜系统向农林系统的转变,植被覆盖度逐渐上升,土壤侵蚀逐渐减少,需要施用的农家肥就越来越少。

3.4　农牧结合模式的作用

从农牧业结合模式来看,西南高山峡谷区不同地带农户均采用了农业和畜牧业相结合的循环模式,这种模式不仅实现了资源的循环利用,而且通过牲畜粪便和作物秸秆混合形成的农家肥料改善了土地质量,增强了土壤肥力和抗蚀性。传统的农业生产模式往往过度使用农药和化肥,导致土壤结构被破坏,引起土地退化以及水土流失等环境问题,而种养结合模式采用有机农家肥,有效减少了农户对化肥和农药的依赖[43—44],同时也使土壤肥力得到了恢复和积累,在一定程度上增强了地力资本,减少了水土流失。Hilimire[45] 指出,农场尺度的农牧结合生产系统可以有效替代专业化农业生产系统,提高土壤肥力及土地利用效率,增加产量。农牧结合可以促进养分在“土壤-植物-动物”所构成的农作系统内循环利用,减少畜禽粪便所造成的环境污染和秸秆焚烧所造成的大气污染,实现清洁生产与健康养殖[46]。

4　结论

本研究基于西南高山峡谷区 4 个地带的调研数据,对比了不同地带农牧业结合模式,并分析了农家肥施用差异的多元影响因素及其与土壤侵蚀的关联,主要结论如下:

(1)西南高山峡谷区不同地带农牧模式与农家肥施用差异显著:高山村依托高海拔草场资源,采用“放牧+回圈”模式,牛群自然积肥为主,户均养殖 13.74 头,秸秆还田率高,农家肥施用量达 2314.88 kg/hm^2,形成“低侵蚀-低施肥”循环;高半山村采用“暖季放牧+冬季补饲”,种植青稞、小麦(户均 0.87 hm^2),但养殖规模小(6.39 头/户),粪肥产量有限,农家肥施用量达 1758.69 kg/hm^2;半山村因强侵蚀(中度/强烈侵蚀占比 58%)和秸秆短缺,采用“放牧+松针垫圈+补饲”模式,需收集松针(1886.70 kg/户/年),养殖规模 8.01 头/户,农家肥施用量达 6129.58 kg/hm^2,为四地带中最高;河谷村受劳动力析出影响,转向“圈养+经济作物”,虽侵蚀轻微,但因一年种植两季作物,农家肥施用量达 6415.87 kg/hm^2。

(2)土壤侵蚀强度是农家肥施用的核心驱动因素,其直接影响表现为土壤水力侵蚀程度每增加 1 个等级,农家肥施用量提高 36.2%(P<0.01),半山村因强烈侵蚀(侵蚀指数为 2.8),单位面积施肥量为高山村的 2.6倍,验证了“侵蚀越强-施肥量越大”的正向关联。而农牧模式与社会经济条件对该驱动关系具有调节作用:放牧型模式(高山村、高半山村)通过自然还田降低施肥依赖,圈养型模式(河谷村)因粪肥集中施用导致单位面积施肥量较高,补饲型模式(半山村)需人工干预积肥以应对强侵蚀;农业劳动力每增加 1 人,施肥量提升 52.4%(P<0.01),政府补贴每增加 10%,施肥量提高 10.6%(P<0.1),反映劳动密集型积肥对人力的依赖及政策激励对农户积肥成本的降低作用。

本研究揭示了不同地带整合作物和牲畜系统以产生足量的农家肥来维系地力资本的不同方式,不仅对西南高山峡谷区水土流失治理以及实现绿色可持续发展具有重要意义,还为农业生产力的提高以及区域生态恢复提供了重要指导。

参考文献(References):

[1] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报, 2008, (5): 802-809.

[2] 第一次全国水利普查公报. 中国水利, 2013(7): 1-3.

[3] 马孝劬. 发扬我国农牧结合、用养结合的优良传统. 中国农史, 1983, 2(4): 61-69.

[4] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报. 中国水土保持, 2013(10): 2-3, 11.

[5] Gao C, Sun B, Zhang T L. Sustainable nutrient management in Chinese agriculture: challenges and Perspective[1]. Pedosphere, 2006, 16(2): 253-263.

[6] Traore O, Some A N, Traore K, Somda K. Effect of land use changes on some important soil properties in cotton based farming systems in Burkina Faso. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2007, 1(1): 7-14.

[7] Blaikie E, Brookfield H. Land degradation and society. London: Routledge, 1987.

[8] 关法春, 陈宏波, 李忠和, 祝延立, 陈大勇, 解娇, 任清丹, 郗登宝, 王鑫. 再论农家肥当代生产生态价值. 农业与技术, 2024, 44(4): 82-85.

[9] Lentz R D, Lehrsch G A, Brown B, Johnson-Maynard J, Leytem A B. Dairy manure nitrogen availability in eroded and noneroded soil for sugarbeet followed by small grains. Agronomy Journal, 2011, 103(3): 628-643.

[10] Singh R, Babu S, Avasthe R K, Meena R S, Yadav G S, Das A, Mohapatra K P, Rathore S S, Kumar A, Singh C. Conservation tillage and organic nutrients management improve soil properties, productivity, and economics of a maize-vegetable pea system in the Eastern Himalayas. Land Degradation & Development, 2021, 32(16): 4637-4654.

[11] Pinamonti F, Zorzi G. Experiences of compost use in agriculture and in land reclamation projects//The Science of Composting. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 517-527.

[12] Gilley J E, Eghball B. Runoff and erosion following field application of beef cattle manure and compost. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1289-1294.

[13] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.

[14] Loch R J. Using rill/interrill comparisons to infer likely responses of erosion to slope length: implications for land management. Soil Research, 1996, 34(4): 489.

[15] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 邓育江, 高德武. 黑龙江省土壤流失方程的研究. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9, 18.

[16] 高金晶. 异地搬迁情景下农牧结合模式效益分析——以霍城县移民为例[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.

[17] Mikha M M, Benjamin J G, Stahlman P W, Geier P W. Remediation/restoration of degraded soil: I. impact on soil chemical properties. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 252-260.

[18] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.

[19] 周金星, 关颖慧, 汪亚峰, 秦伟, 何丙辉, 王克勤, 吴秀芹, 万龙, 丁亚丽. 西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范. 生态学报, 2024, 44(18): 7937-7943.

[20] 畅益锋. 西藏自治区下大力气治理水土流失. 中国水土保持, 2002(8): 45.

[21] Cai D W, Ge Q S, Wang X M, Liu B L, Goudie A S, Hu S. Contributions of ecological programs to vegetation restoration in arid and semiarid China. Environmental Research Letters, 2020, 15(11): 114046.

[22] 全国水土保持规划编制工作领导小组办公室, 水利部水利水电规划设计总院. 中国水土保持区划. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

[23] 李志鹏. 农家肥发酵、矿化过程养分变化及其对土壤理化性质和烟叶品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.

[24] 王轶浩, 耿养会. 三峡库区小流域不同生态恢复阶段的水土流失特征. 水土保持学报, 2013, 27(4): 78-82.

[25] 李昊, 陈南旭. 多维视角下农户施肥行为的理论逻辑与经验探索. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2023(1): 93-105.

[26] 胡宁, 傅瓦利, 马志敏, 甄晓君, 袁红. 岩溶石漠化山地不同退耕模式土壤抗蚀性及其与结构体分形关系研究. 中国岩溶, 2008, 27(2): 115-121.

[27] 朱利群, 王珏, 王春杰, 张培培. 有机肥和化肥配施技术农户采纳意愿影响因素分析——基于苏、浙、皖三省农户调查. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 671-679.

[28] 王恒, 易小燕. 绿色发展背景下农户施肥及其决策行为研究进展. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(8): 1284-1292.

[29] 褚彩虹, 冯淑怡, 张蔚文. 农户采用环境友好型农业技术行为的实证分析——以有机肥与测土配方施肥技术为例. 中国农村经济, 2012(3): 68-77.

[30] 苏淑仪, 周玉玺, 周霞. 基于 Meta 分析的农户有机肥施用行为影响因素研究. 中国农业资源与区划, 2022, 43(5): 12-20.

[31] 杨钰蓉, 罗小锋. 减量替代政策对农户有机肥替代技术模式采纳的影响——基于湖北省茶叶种植户调查数据的实证分析. 农业技术经

济, 2018(10): 77-85.

[32] 孔凡斌, 钟海燕, 潘丹. 小农户土壤保护行为分析——以施肥为例. 农业技术经济, 2019(1): 100-110.

[33] Tian G, Kang B T, Kolawole G O, Idinoba P, Salako F K. Long-term effects of fallow systems and lengths on crop production and soil fertility maintenance in West Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71(2): 139-150.

[34] Materechera S A. Utilization and management practices of animal manure for replenishing soil fertility among smallscale crop farmers in semi-arid farming districts of the North West Province, South Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 87(3): 415-428.

[35] Gill J S, Sale P W G, Peries R R, Tang C. Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic subsoil following incorporation of organic amendments. Field Crops Research, 2009, 114(1): 137-146.

[36] Mikha M M, Benjamin J G, Vigil M F, Poss D J. Manure and tillage use in remediation of eroded land and impacts on soil chemical properties. PLoS One, 2017, 12(4): e0175533.

[37] Tiwari K R, Sitaula B K, Bajracharya R M, Børresen T. Effects of soil and crop management practices on yields, income and nutrients losses from upland farming systems in the Middle Mountains region of Nepal. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86(2): 241-253.

[38] 王有彬. 草原气候条件与天然牧草生长的关系分析. 农家参谋, 2020(12): 92.

[39] Larney F J, Angers D A. The role of organic amendments in soil reclamation: a review. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(1): 19-38.

[40] 郑凯丽, 阎建忠, 何威风. 劳动力析出对山区牲畜养殖的影响——以重庆市典型区为例. 西南大学学报: 自然科学版, 2016, 38(4): 35-41.

[41] 谷中原, 吴师法. 山区农村劳动力流动对农村发展的负面影响与消解——以湘西花垣县团结镇为例. 郑州航空工业管理学院学报, 2007, 25(5): 65-69.

[42] 田玉军, 李秀彬, 马国霞, 郝海广. 劳动力析出对生态脆弱区耕地撂荒的影响. 中国土地科学, 2010, 24(7): 4-9.

[43] Mugwe J, Otieno E O. Integrated soil fertility management approaches for climate change adaptation, mitigation, and enhanced crop productivity// Handbook of Climate Change Management. Cham: Springer International Publishing, 2021: 1-22.

[44] 张浪, 周玲红, 魏甲彬, 成小琳, 徐华勤, 肖志祥, 唐启源, 唐剑武. 冬季种养结合对双季稻生长与土壤肥力的影响. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 226-236.

[45] Hilimire K. Integrated crop/livestock agriculture in the United States: a review. Journal of Sustainable Agriculture, 2011, 35(4): 376-393.

[46] 王希全, 杨亚东, 张凯, 赵杰, 曾昭海. 农牧结合的意义、发展历程及前景. 农学学报, 2020, 10(1): 27-31.