

基于 CSLE 模型的 2024 年福建省典型区域 水土流失特征及其差异评估

蒲坚^{1,2,3,4}, 李建明^{3,4}, 王文龙^{1,2,5}, 王志刚^{3,4},
张长伟^{3,4}, 许文盛^{3,4}, 刘纪根^{3,4}, 朱秀迪⁶, 卢顺发⁷

(1.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心 水土保持与荒漠化
整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 4.水利部 西南山区中小河流与山洪灾害野外
科学观测研究站, 湖北 武汉 430010; 5.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌
712100; 6.长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051; 7.福建省水土保持试验站, 福建 福州 350003)

摘要: [目的] 研究福建省不同典型区域在地形地貌、植被覆盖度和土地利用等多种因素综合作用下的水土流失规律, 为该区域水土流失治理和高质量发展提供科学依据和实践指导。[方法] 基于 2 m 高分辨率遥感影像对福建省闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区 4 个典型区域开展土地利用解译, 采用中国土壤流失方程(CSLE)模型对 2024 年水土流失进行计算, 并基于土地利用类型、海拔、坡度和植被覆盖度等影响因素开展对比分析, 进而阐明福建省不同区域水土流失特征。[结果] ①福建省总体呈现出林地面积占总土地面积比例最高(73.36%)但林地地类水土流失比例较低(5.51%), 而园地、草地和建设用地的地类面积占总土地面积比例较小但其地类水土流失比例较高(16.98%~21.54%); ②福建省各区域海拔以 1 000 m 以下为主, 水土流失比例分布在 5.15%~9.18%, 其中闽东南区水土流失比例在 1 200 m 以上显著递增; 福建省各区域平均坡度小于 20°, 其中闽东南区的平均坡度最低为 14.87°。福建省各区域 87.85%~93.91% 的水土流失面积发生在坡度 $\leq 35^\circ$ 的区域; ③福建省各区域流失面积总体呈现随植被覆盖度增加而增加的趋势, 此外林地流失比例随植被覆盖度增加而逐渐降低; 园地流失比例除闽东南区随植被覆盖度增加而逐渐增加外, 其他区域逐渐降低。[结论] 福建省不同土地利用类型水土流失特征受坡度、海拔和植被覆盖度多因素影响, 尤其需要加强园地、草地和建设用地的水土流失治理工作, 不同区域需针对特定的水土流失特征进行针对性治理。

关键词: 水土流失; CSLE 模型; 土地利用; 地形; 植被覆盖度; 福建省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)01-0153-13

中图分类号: S157.1

文献参数: 蒲坚, 李建明, 王文龙, 等. 基于 CSLE 模型的 2024 年福建省典型区域水土流失特征及其差异评估[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 153-165. Pu Jian, Li Jianming, Wang Wenlong, et al. Soil erosion characteristics and assessment of their differences in typical regions of Fujian Province in 2024 based on CSLE model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 153-165.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.019

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.019

Soil erosion characteristics and assessment of their differences in typical regions of Fujian Province in 2024 based on CSLE model

Pu Jian^{1,2,3,4}, Li Jianming^{3,4}, Wang Wenlong^{1,2,5}, Wang Zhigang^{3,4},

Zhang Changwei^{3,4}, Xu Wensheng^{3,4}, Liu Jigen^{3,4}, Zhu Xiudi⁶, Lu Shunfa⁷

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Education, State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

收稿日期: 2025-06-18

修回日期: 2025-10-13

采用日期: 2025-10-13

资助项目: 福建省水利厅项目“2024年福建省年度水土流失动态监测数据采集”(CKSK2024811/TB); 广东省水利科技创新项目“构建崩岗危害评价指标体系与探索新型崩岗治理模式研究”(2024-02); 湖北省自然科学基金项目“自然-社会”影响下武汉市小微湿地景观格局时空演变研究”(2024AFB407)

第一作者: 蒲坚(1993—), 男(汉族), 山西省霍州市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持信息化研究。Email: jian.pu@nwafu.edu.cn。

通信作者: 王文龙(1964—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: wlwang@nwafu.edu.cn。

100049, China; 3.Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China; 4.Small and Medium-sized Rivers and Mountain Torrent Disasters Observation and Research Station for Southwest Mountainous Areas, Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430010, China; 5.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 6.Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan, Hubei 430051, China; 7.Soil and Water Conservation Experimental Station of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: [Objective] Soil erosion patterns in different typical regions in Fujian Province were investigated under the combined effects of multiple factors such as topography and geomorphology, vegetation coverage, and land use, in order to provide a scientific basis and practical guidance for soil erosion control and high-quality development in this region. [Methods] Based on 2 m high-resolution remote sensing images, land use interpretation was conducted for four typical regions of Fujian Province, namely northwest Fujian, northeast Fujian, southwest Fujian, and southeast Fujian. The Chinese soil loss equation model was used to calculate soil erosion in 2024, and a comparative analysis was carried out based on influencing factors such as land use type, elevation, slope, and vegetation coverage, thereby clarifying the soil erosion characteristics of different regions in Fujian Province. [Results] ① The results showed that forest land accounted for the largest proportion of the total land area in Fujian Province (73.36%), while its soil erosion ratio was relatively low (5.51%). In contrast, the areas of garden plots, grassland, and construction land accounted for smaller proportions of the total land area, but their soil erosion ratios were relatively high (16.98%—21.54%). ② The elevation of various regions in Fujian Province was mainly below 1 000 m, with soil erosion ratios ranging from 5.15% to 9.18%. Among them, the soil erosion ratio in the southeast Fujian region increased significantly above 1 200 m. The average slope of all regions in the province was below 20°, with the southeast Fujian region exhibiting the lowest average slope of 14.87°. Across the province, 87.85%—93.91% of the soil erosion area occurred in regions with slopes $\leq 35^\circ$. ③ Overall, the soil erosion area in various regions generally showed an increasing trend with increasing vegetation coverage. In addition, the erosion ratio of forest land gradually decreased as vegetation coverage increased, while the erosion ratio of garden plots gradually decreased in most regions, except in the southeast Fujian region, where it increased with increasing vegetation coverage. [Conclusion] The soil erosion characteristics of different land use types in Fujian Province are affected by multiple factors, such as slope, elevation, and vegetation coverage. In particular, it is necessary to strengthen the soil erosion control of garden plots, grassland, and construction land, and different regions need to carry out targeted control based on specific soil erosion characteristics.

Keywords: soil erosion; CSLE model; land use; topography; vegetation coverage; Fujian Province

水土流失是指水土资源与土地生产力在水力、风力、冻融和人类活动的综合作用下发生破坏和损失的现象,会造成土地退化、面源污染和河湖泥沙淤积等一系列生态环境问题,危害人类的日常生活和经济可持续发展^[1]。中国是全球水土流失最严重的国家之一,《中国水土保持公报(2024年)》显示,2024年中国水土流失面积达 $2.60 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其中,中国南方红壤丘陵区土地面积占全国总面积的21%,水土流失也较为严重,仅次于黄土高原^[2]。该区域的地形以低山丘陵为主,加之气温高,降水量大等自然特征,更易发生水土流失,此外在经济发展过程中人为活动的影响,进一步加剧了水土流失的程度^[3-4]。

福建省作为南方红壤丘陵区的典型代表,也是开展水土流失重点治理的省份。该省不断加强水土流失动态监测的频次以及开展水土流失防治工作,

为福建省水土保持工作顺利开展和成效取得奠定了基础^[5-7]。1985—2000年福建省先后开展的3次水土流失遥感调查工作,主要基于人机交互,采用植被覆盖度、土地利用类型和坡度的3因子方法进行水土流失调查^[8]。之后的水土流失调查采用基于RUSLE的改进模型中国水土流失方程CSLE,利用7个土壤侵蚀因子进行水土流失动态监测,该方法同时也受到国内学者的广泛应用^[9]。基于对不同地类水土流失进行计算,并对水土流失的现状、空间分布特征和变化等方面进行了分析评价,进而为各地区开展水土流失治理工作提供了详实的数据基础^[10-11]。尤其是在福建地区,针对水土流失已开展较多研究并取得系列成果:陈贤干^[12]采用USLE模型对福建省1990, 2000和2010年3个时期的水土流失进行动态监测和强度变化分析,表明1990—2010年福建省水土流失

面积逐渐减少,土壤侵蚀强度主要集中在轻度,土壤侵蚀情况逐渐转好。曾舒娇等^[7]采用 USLE 模型,对福建省 1990—2015 年的水土流失进行动态监测和时空变化分析,表明水土流失主要分布在西部和东南部,中部和北部分布较少。王振平等^[13]采用 USLE 模型计算福建省 2014 年的水土流失,并分析其主要分布的海拔、坡度和地类,表明容易发生水土流失的土地利用类型为裸地和林地。汪水前^[14]采用 CSLE 模型计算闽清县 2018 年的水土流失,分析其面积、强度、消长情况以及各乡镇和地类的分布情况。石秀梅^[3]对比分析了福建省 14 个重点县(市)的 2015—2018 年土壤侵蚀时空变化特征及水土保持措施,统计分析各类水保措施治理效益及其驱动因子。此外陆盛添^[15]、张信羌^[16]、高德正^[17]还基于当地的水土流失动态监测结果,提出了针对性的水土流失治理对策建议。然而,现有研究大多聚焦于利用 USLE/CSLE 模型揭示水土流失的时空格局、动态变化及其与单一环境因子的统计关系。这些研究回答了区域水土流失分布和数量的问题,但对于背后主导因素的机制性探讨尚显不足。具体而言,对于自然因素(如地形、气候)和人为活动因素(土地利用类型变化)如何在不同空间单元内相互作用,并量化其对水土流失的相对贡献,仍缺乏深入系统的研究。这种对驱动机制认识的模糊,限制了水土保持措施从“面”上规划向“点”上精准施策的进一步优化。为此,本研究以福建省闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区 4 个典型区域为例,基于 2024 年的 CSLE 模型水土流失动态监测成果数据,重点探究以下两大问题。①不同土地利用类型在不同海拔、坡度及植被盖度等级下的面积分布、水土流失面积和水土流失比例分布的差异。②自然与人为因素在不同区域对水土流失的贡献程度及影响机制。通过构建“地类-地形-植被”多维分析框架并分析区域差异,本研究期望从驱动机制层面深化对红壤丘陵区水土流失的理解,为福建省乃至同类型地区的水土流失精准治理和风险管控提供更为科学的决策支持。

1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,地理位置为东经 115°50′—120°40′,北纬 23°33′—28°20′,属于典型的亚热带海洋季风气候区,夏季高温多雨,全省多年平均气温 19.5℃,年平均降雨量在 1 654~1 670 mm,多年平均蒸发量约 1 400 mm。陆地面积 80% 以上为山地和丘陵,沿海地带以侵蚀海岸为主,地势总体呈西北高、东南低的马鞍形分布。植被类型以亚热带植被

为主,是中国森林覆盖率最高的省份之一,达到 65.12%,其中又以亚热带常绿阔叶林和针叶林为核心植被,沿海地区茶园、果园等人工植被分布广泛^[18]。山脉以东北-西南走向为主,从西北往东南主要有 3 层结构。第 1 层是福建与江西交界的武夷山脉,该山脉跨度大,阻挡来自北方的寒冷气流和东南的暖湿气流,使各地以海洋性气候为主。第 2 层是以鹫峰山和玳瑁山为代表的山系,这一层与武夷山之间以丘陵、盆地为主。第 3 层是以太姥山、戴云山和博平岭连成一线的山系,这一层往南海拔逐渐变低,一直延伸到海岸线。3 条主要山脉将福建省划分为 4 个典型区域,其中闽西北区(南平市)和闽西南区(龙岩市)主要位于第 1 层和第 2 层山系上,闽东北区(宁德市)和闽东南区(漳州市)主要位于第 3 层山系上并靠近海岸线。因此,这 4 个典型区域反映了福建省由西北山区丘陵区向东南沿海平原区过渡的典型地势变化,也是本文的研究区域。

福建省面积为 122 870 km²,其中闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区的面积分别为 26 312, 13 644, 19 052 和 12 608 km²。福建省地形以山地和丘陵为主,地势西北高东南低,地貌以山地丘陵为主。其中闽西北区为福建地势最高的区域,地貌以中低山为主。闽东北区地势西高东低,中部隆起,地貌以低山、丘陵为主,其间杂有山间盆地,沿海一带为狭长的滨海冲积平原;闽西南区地势东高西低,北高南低,地貌以山地、丘陵为主;漳州市地势西北高、东南低,地貌呈现山地、丘陵、平原阶梯状分布。福建省各区生态系统类型均以森林生态系统为主,其中闽东南区的农业生态系统相较于其他区域占比较高。福建省依托丰富的山海资源,因地制宜发展特色农林渔业并强化生态功能。其中,闽西北区与闽西南区作为重要生态屏障,以竹木、茶叶等林下经济为重点,突出生态公益林保育与生态产品价值实现;而闽东北区与闽东南区则凭借沿海区位优势,大力发展高附加值水产养殖与亚热带水果产业,城镇化、市场化特征更为显著。

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

本研究采用的数据包括 7 类:①降雨数据。获取福建省 69 个气象站点 1986—2015 年的日降水量统计数据,用于计算降雨侵蚀力因子。②土壤数据。采用第 1 次全国水利普查水土保持情况普查土壤可蚀性因子成果,并基于收集到的土种志中的土壤相关数据更新,经最邻近法重采样生成 10 m 分辨率土

壤可蚀性因子栅格数据。③地形数据。基于收集的福建省自然资源厅提供的1:10 000地形图数据,经地形数据质检与修正后消除异常值和空洞,生成10 m分辨率的DEM栅格数据。④遥感影像数据。采用中国资源卫星应用中心(<https://data.cresda.cn//home>)提供的高分一号(GF-1)、高分六号(GF-6)和资源三号(ZY-3)卫星影像,时相为2024年1—4月,空间分辨率为2 m,云雾面积小于5%且未覆盖重要地物。影像经过几何校正、镶嵌、匀光匀色等处理后,结合野外实地调查建立遥感影像解译标志,之后人工目视解译土地利用类型和水土保持措施类型矢量,解译准确率大于90%。⑤植被覆盖产品数据。获取2024年前3 a(2021—2023年)的MOD13Q1归一化植被指数(NDVI)产品,空间分辨率为250 m。经投影变换、最大值合成法去除空值,归一化,最临近法重采样为24个半月10 m分辨率NDVI栅格数据。⑥土地利用数据。根据上年度水土流失动态监测土地利用类型解译成果,用于本研究2024年度土地利用更新解译。解译成果为基于2 m遥感影像解译得到的土地利用类型矢量数据,解译准确率大于90%。⑦水土保持重点工程资料。来源于各县上报及统计复核后的水土流失综合治理项目和水土保持重点治理工程等数据,包括设计、实施、监理、监测、竣工验收及信息化监管成果等相关资料。数据经过校核与处理,制作梯田、水平阶等水土保持工程措施因子矢量数据,用于辅助遥感解译水土保持措施信息。

2.2 研究方法

2.2.1 计算公式

福建省位于水力侵蚀地区,本研究采用中国水土流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀模数,计算公式为^[9]

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_{AN} \left(1 - \frac{S_{IL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left\{ \frac{S_{IL}}{C_{LA} + S_{IL}} \right\}^{0.3} \times \left\{ 1 - \frac{0.25C}{[C + \exp(3.718 - 2.947C)]} \right\} \times \left[1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + \exp(-5.509 + 22.899SN_1)} \right] \quad (6)$$

$$SN_1 = \frac{1 - S_{AN}}{100}$$

式中: S_{AN} 、 S_{IL} 、 C_{LA} 、 C 分别指砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%).之后经过重采样为10 m空间分辨率的栅格数据。

2.2.4 坡长坡度因子LS

坡长坡度因子经过以下公式计算后重采样为10 m空间分辨率的栅格数据^[21]。坡长因子 L 计算公式为

$$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) \times (22.13)^m} \quad (7)$$

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[t/(hm^2 \cdot a)]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; L 为坡长因子(无量纲); S 为坡度因子(无量纲); B 为植被覆盖与生物措施因子(无量纲); E 为工程措施因子(无量纲); T 为耕作措施因子(无量纲)。

2.2.2 降雨侵蚀力因子 R

降雨侵蚀力(R)计算公式^[18-19]为

$$R = \sum_{k=1}^{24} R_{\text{半月}k} \quad (2)$$

$$R_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (3)$$

$$WR_{\text{半月}k} = \frac{R_{\text{半月}k}}{R} \quad (4)$$

式中: k 为1 a的24个半月,取值1~24; $R_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力; N 为1986—2015年的时间序列; m 为第 i 年第 k 个半月内侵蚀性降雨日的数量(侵蚀性降雨日指日雨量 ≥ 10 mm); $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性降雨量; α 为参数,暖季(5—9月)为0.393 7,冷季(10—12月,1—4月)为0.310 1; $WR_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月平均降雨侵蚀力($R_{\text{半月}k}$)占多年平均降雨侵蚀力(R)的比例。

将站点多年平均24个半月降雨侵蚀力(R)转为矢量,采用普通克里金空间插值方法,获得10 m分辨率的24个半月降雨侵蚀力空间栅格数据。

2.2.3 土壤可蚀性因子 K

土壤可蚀性因子基于收集的福建省土壤志中的土壤相关数据重新分类、分级到各土种类型,运用Williams的EPIC模型计算公式计算^[20]:

式中: λ_i 、 λ_{i-1} 为第 i 个和 $i-1$ 个坡段的坡长; m 为随坡度变化的坡长指数。

$$m = \begin{cases} 0.2 & (\theta \leq 1^\circ) \\ 0.3 & (1^\circ < \theta \leq 3^\circ) \\ 0.4 & (3^\circ < \theta \leq 5^\circ) \\ 0.5 & (\theta > 5^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

坡度因子 S 的计算公式为

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta - 0.55 & (5^\circ < \theta \leq 10^\circ) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ 为坡度。其中林地、草地 $\theta > 30^\circ$ 时,取 30° 代入公式计算;当林地、草地 $\theta \leq 30^\circ$,按照 $S = 10.8 \sin \theta + 0.03$ 公式计算。

2.2.5 植被覆盖与生物措施因子B

基于目视解译的土地利用类型矢量,转为10 m分辨率栅格数据,并计算各地类B因子值。其中园地、林地和草地采用公式计算,其他地类直接通过查阅《2024年度水土流失动态监测技术指南》进行地类赋值^[22]。园地、林地和草地B因子计算公式:

$$B = \sum_{i=1}^{24} SLR_i \cdot WR_i \quad (10)$$

式中: WR_i 为第*i*个半月降雨侵蚀力占全年侵蚀力比例,取值范围0~1; SLR_i 为第*i*个半月园地、林地和草地的土壤侵蚀比例,取值范围0~1,计算公式按照地类分别为:

茶园和灌木林地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.7647 + 0.86242 \times 1.05905^{100 \times FVC}} \quad (11)$$

果园、其他园地、有林地和其他林地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{0.44468 \times e^{(-3.20096 \times GD)} - 0.04099 \times e^{(FVC - FVC \times GD)} + 0.025}{0.04099 \times e^{(FVC - FVC \times GD)} + 0.025} \quad (12)$$

草地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100 \times FVC}} \quad (13)$$

式中:FVC为基于NDVI计算的植被覆盖度,取值范围为0~1;GD为乔木林的林下盖度,取值范围为0~1,参考实地调查取值^[20]。

2.2.6 工程措施因子E

根据目视解译与现场调查,福建省水土保持工程措施主要为土坎水平梯田和水平阶,查阅水土保持工程措施因子赋值表,得到对应水土保持工程措施因子值0.084和0.151^[23]。经重采样生成10 m分辨率的工程措施因子栅格数据。

2.2.7 耕作措施因子T

针对解译得到的耕地地类,查阅《中国土壤耕作制度70年》,福建省所属耕作区包括浙闽丘陵山地水田旱地三熟二熟区和华南低平原晚三熟区,经查阅对应耕作区的耕作措施因子赋值表,耕作措施因子值分别赋值0.354,0.466^[23]。经重采样生成10 m分辨率的耕作措施因子栅格数据。

2.2.8 土壤侵蚀强度判定

对于建设用地中的人为扰动地块,根据其原地面平均坡度和解译的措施或覆盖状况,判定其土壤侵蚀强度;对于其他土地利用类型,依据《土壤侵蚀

分类分级标准(SL 190—2007)》中的南方红壤丘陵区标准,将每个栅格的土壤侵蚀强度判定为微度侵蚀[$< 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、轻度侵蚀[$500 \sim 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、中度侵蚀[$2\,500 \sim 5\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、强烈侵蚀[$5\,000 \sim 8\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]、极强烈侵蚀[$8\,000 \sim 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]和剧烈侵蚀[$> 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$]共6个侵蚀等级。

2.2.9 结果统计分析

分别按照8类土地利用类型、8类海拔梯度区间、9类坡度分布区间和5类植被盖度等级,统计每类的土地面积为地类面积,轻度侵蚀及以上的土壤侵蚀强度面积为流失面积,每种土地利用类型的流失面积除以地类面积得到流失比例。并将海拔、坡度和植被盖度按照土地利用类型区分,统计每种土地利用类型在每类海拔、坡度和植被盖度上的流失面积。分析不同典型区域的土地利用类型、海拔、坡度和植被盖度的分布情况和流失特征,以及不同土地利用类型水土流失特征受坡度、海拔和植被覆盖度的影响。

2.2.10 野外复核验证

为验证监测结果的准确性,本研究基于《2024年度水土流失动态监测技术指南》,选择福建省4个区域水土流失图斑总数的0.66%,共计4 128个图斑开展野外实地验证,复核水土流失强度计算的准确性。结果显示,水土流失图斑的土地利用类型准确率为92.19%,水土流失强度等级分级准确率为90.19%,精度均高于90%,满足研究精度要求,确保后续分析结论的可靠性。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型水土流失特征

根据《2024年度水土流失动态监测技术指南》将土地利用划分为耕地、园地、林地、草地、建设用地、交通运输用地、水域及水利设施用地和其他用地8种1级地类,地类和流失面积及流失比例如图1所示。从地类面积分析,福建省林地面积最大,园地、耕地、建设用地次之,水域及水利设施用地、交通运输用地、草地和其他用地面积较小。4个典型区域中闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区的林地面积占土地总面积比例分别达到80.36%,71.73%,84.12%和57.23%,均值为73.36%;闽东北区和闽东南区的园地面积排第2,园地面积占土地总面积比例分别为11.17%和19.27%,而闽西北区和闽西南区是耕地面积排第2,耕地面积占土地总面积比例分别为9.28%

和 7.13%。闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区占地面积排第 2 的分别是园地、耕地、建设用地,其地类面积占土地总面积比例分别是 5.43%, 8.83%, 3.93% 和 9.28%。总体来看,闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区的主要地类是林地、园地、耕地和建设用地,这 4 种地类面积之和占土地总面积比例分别达到 97.42%, 93.55%, 96.82% 和 92.50%, 剩余的草地、交通运输用地、水域及水利设施占地面积均较

小,其地类面积之和占土地总面积比例均低于总占地面积的 8%。林地受人为扰动较小,而园地、耕地和建设用地均受人影响显著且占地面积也较大,是容易造成水土流失的重要地类。从分布看,园地主要分布在东部沿海地带,而耕地则分布在西部山区。同时,4 个典型区域的建设用地面积占土地总面积比例在 1.82%~9.28%,均值为 4.35%,闽东南区最高,也是福建省经济最发达区域。

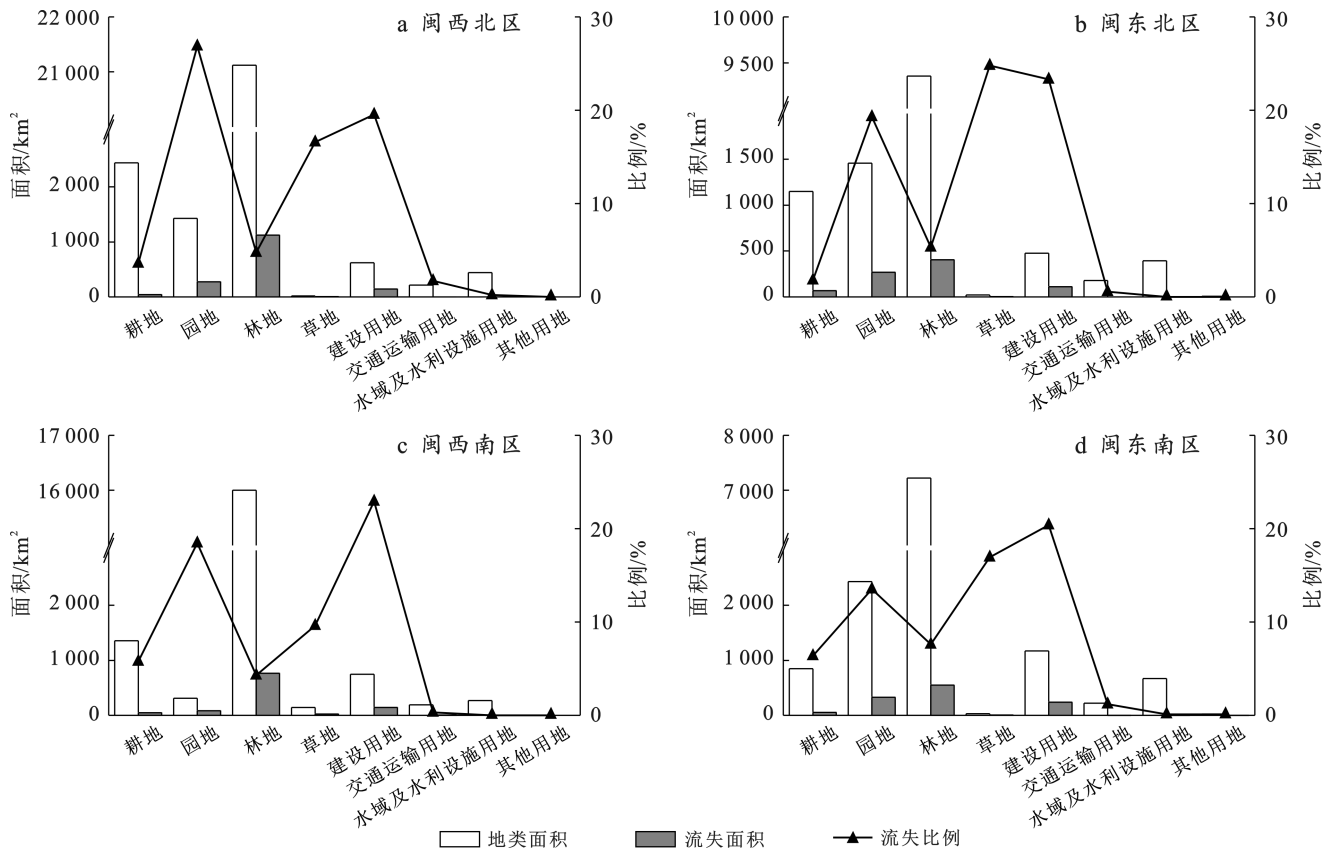


图 1 福建省土地利用和水土流失面积及比例

Fig.1 Areas and proportions of land use types and soil erosion in Fujian Province

福建省整体水土流失比例在 10% 以下,其中闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区的整体水土流失比例分别是 6.07%, 6.52%, 5.62% 和 9.35%,闽东南区的水土流失比例显著高于其他 3 个区域,闽西南的水土流失比例最低。从地类分析,福建省林地的流失面积绝对值最大,但由于林地地类面积也最高,其水土流失比例均低于整体水土流失比例。而园地、草地和建设用地的地类面积占总土地面积比例较小,但其地类水土流失比例较高。其中闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区林地的水土流失比例分别是 5.33%, 4.31%, 4.76% 和 7.62%,均值为 5.51%。闽东北区和闽东南区不同地类中建设用地的水土流

失比例最高,分别为 22.92% 和 20.39%;闽西北区草地水土流失比例最高为 24.78%,闽西南区园地的水土流失比例最高为 26.85%。从总体上看,闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区园地、草地和建设用地的水土流失比例均较高,3 种地类水土流失比例变化范围分别为 13.52%~26.85%, 9.60%~24.78%, 19.53%~23.32%, 均值分别为 19.53%, 16.98% 和 21.54%。因此,对于福建省水土保持工作开展,需要重点关注由于人为扰动强烈的园地、草地和建设用地导致的水土流失问题。交通运输用地、水域及水利设施用地和其他用地由于整体扰动范围小或者是被硬化覆盖,其整体水土流失比例较小。

3.2 不同海拔水土流失特征

以 200 m 为间距将 4 个典型区域的海拔划分为 8 类,不同海拔梯度面积及水土流失特征如图 2 所示。福建省海拔主要分布在 1 000 m 以下,平均海拔为 492.13 m。从占地面积分析,闽西北区平均海拔为 506.26 m,在海拔 200~400 m 的占地面积最大,随海拔继续增大面积呈显著递减变化,<200 m 的占地面积与 800~1 000 m 相近;闽东北区平均海拔为 576.89 m,在海拔<1 000 m 时各梯度面积总体相近,但>1 000 m 后占地面积呈显著减小趋势;闽西南区平均海拔为 587.72 m,在海拔 400~600 m 时的占地面积最大,随海拔增大后占地面积呈显著递减趋势,<200 m 占地面积与 1 200~1 400 m 占地面积相近;闽东南区平均海拔为 297.63 m,占地面积随海拔增大呈递减变化,其中<200 m 的占地面积最大。

总体上看,闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区<1 000 m 的占地面积分别占总面积的 92.86%, 88.19%, 92.07% 和 98.72%,均值为 92.96%,即福建

省各地区总体以低山为主。

从水土流失面积和比例分析,闽西北区和闽东北区的水土流失比例随海拔增大总体呈波动稳定后显著下降趋势,转折点分别在海拔 1 000~1 200 m 和 600~800 m;闽西南区水土流失比例呈递增—递减—递增的波动变化,其中在海拔>1 400 m 的水土流失比例最大;闽东南区水土流失比例在<1 200 m 时总体较稳定,随后显著递增,主要是因为闽东南区茶果园修建和用材林砍伐较为普遍,在 1 200 m 以上区域的坡度明显增加,导致部分高海拔高坡度园地开发和林地砍伐会造成水土流失程度显著增加。闽西北区、闽东北区、闽西南区、闽东南区在<1 000 m 时的平均水土流失比例分别为 6.12%, 7.07%, 5.15% 和 9.18%,>1 000 m 时的平均水土流失比例分别为 4.22%, 1.85%, 4.90%, 25.13%。研究表明,闽西北区、闽东北区、闽西南区的水土流失主要发生在低山区域,而闽东南区的水土流失主要发生在中山区域。

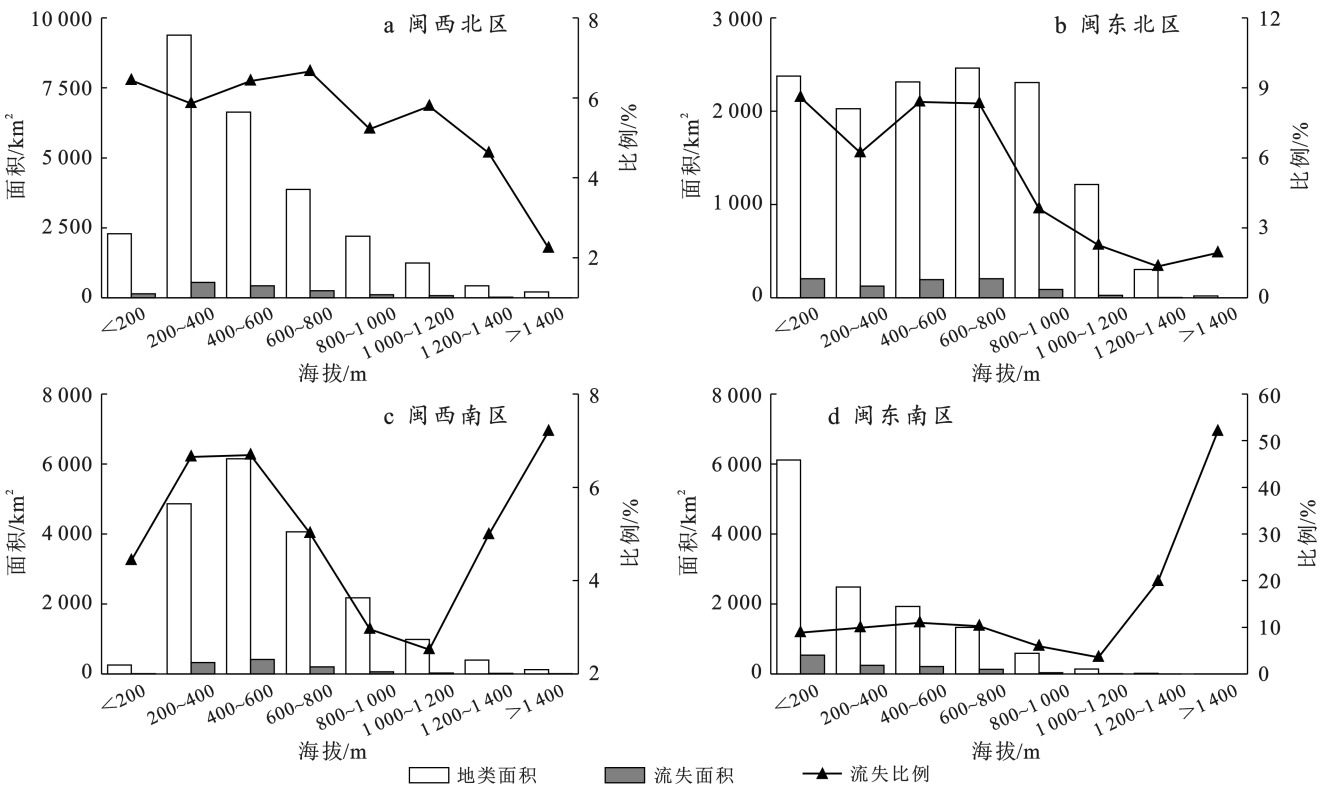


图 2 福建省不同海拔的地类面积、流失面积和流失比例

Fig.2 Areas of land use types, soil erosion area and soil erosion ratio at different elevations in Fujian Province

将 4 个典型区域不同海拔下的地类面积和流失面积按照土地利用类型开展综合分析(图 3)。由图 3 可知,福建省 4 个典型区域林地和其他地类海拔范围分布较广,耕地、园地、草地主要分布在海拔 800 m 以下,建设用地、交通运输用地和水域及水利设施用地

海拔分布较低。①闽西北区耕地、草地、交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 600 m 以下,园地地类面积和流失面积主要分布在 800 m 以下,林地地类面积和流失面积主要分布在 1 000 m 以下,建设用地和水域及水利设施用地地类面积和流失面

积主要分布在 400 m 以下,其他用地地类面积主要分布在 1 200 m 以下;②闽东北区耕地、园地、草地和交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 1 000 m 以下,林地地类面积和流失面积主要分布在 1 200 m 以下,建设用地地类面积和流失面积主要分布在 800 m 以下,水域及水利设施用地和其他用地地类面积主要分布在 600 m 以下;③闽西南区耕地、园地、草地、建设用地、交通运输用地和其他用地地类面积和流失面积主要分布在 200~800 m 范围内,水域及水利设施

用地地类面积和流失面积主要分布在 600 m 以下,林地地类面积和流失面积主要分布在 200~1 000 m 范围内;④闽东南区耕地和园地地类面积和流失面积主要分布在 600 m 以下,交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 400 m 以下,建设用地和水域及水利设施用地地类面积和流失面积主要分布在 200 m 以下,林地、草地地类面积和流失面积主要分布在 800 m 以下,其他用地地类面积和流失面积主要分布在 1 000 m 以下。

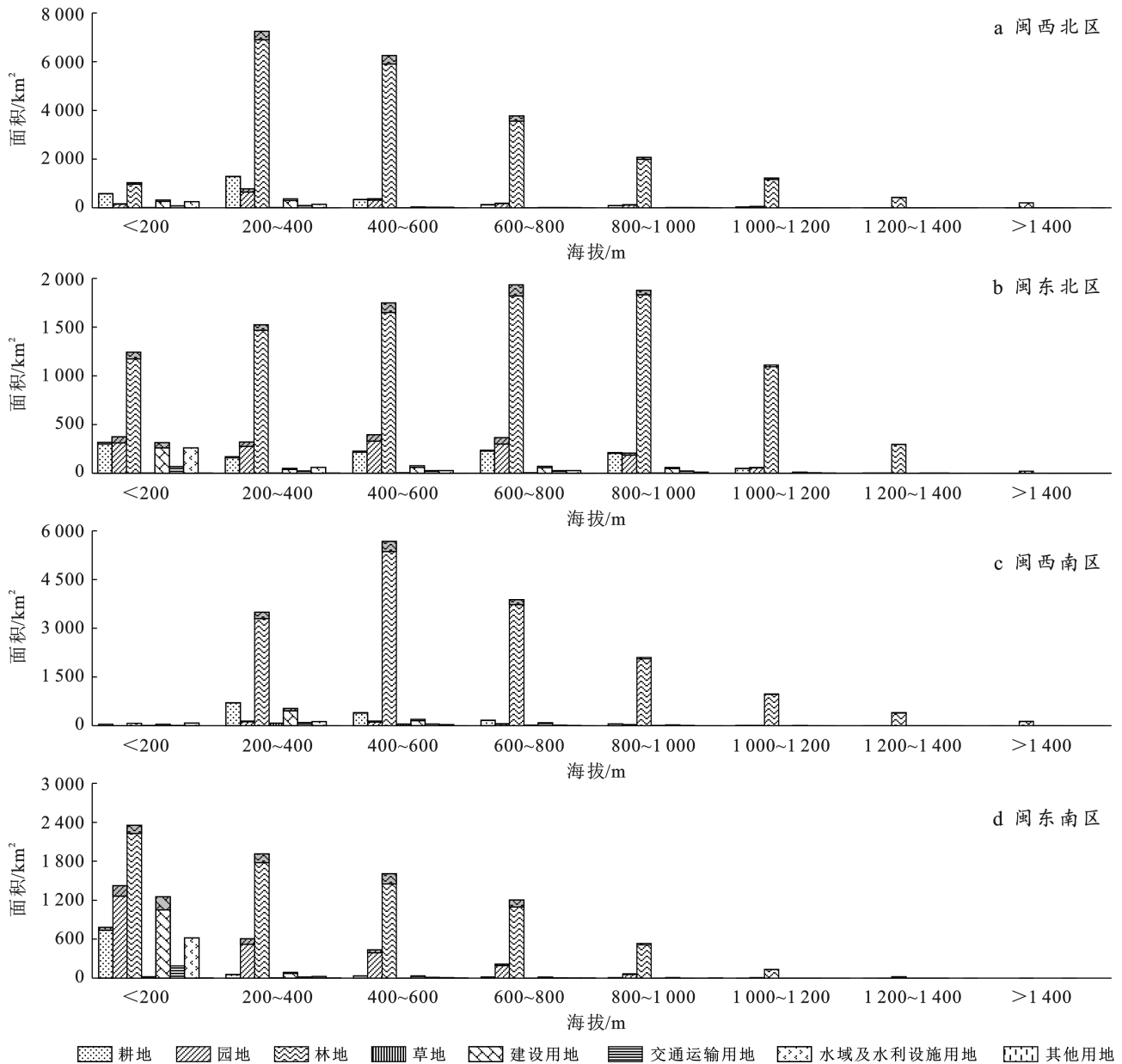


图 3 福建省不同地类在不同海拔的地类面积和流失面积

Fig.3 Areas of different land use types and soil erosion at different elevations in Fujian Province

3.3 不同坡度水土流失特征

本研究将坡度以 5°为间距,分为 9 类。福建省 4 个典型区域不同坡度的地类面积、流失面积和流失比例

分布如图 4 所示。由图 4 可以看出,福建省地类面积和流失面积主要分布在 35°以下。其中闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区坡度 ≤ 35°的占地面积

分别占总面积的 91.24%, 91.82%, 93.47% 和 95.81%, 流失面积分别占总流失面积的比例分别为 87.85%, 90.96%, 92.89% 和 93.91%。从平均坡度分析, 闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区的坡度均值分别为 19.82°, 19.26°, 19.11° 和 14.87°, 即从西北向东南坡度逐渐降低, 但只有闽东南区与其他 3 个区域间差异显著。从流失比例角度分析, 福建省 4 个典

型区域的流失比例总体均随坡度增大呈递增趋势, 在坡度 >25° 后递增趋势减缓甚至有小幅度降低趋势, 总体上看, 闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区在坡度 ≤25° 的平均流失比例为 5.09%, 5.83%, 5.14% 和 9.06%, >25° 分别为 7.87%, 7.40%, 6.12% 和 13.09%, 总体上, 闽东南区的流失比例显著高于其他 3 个区域。

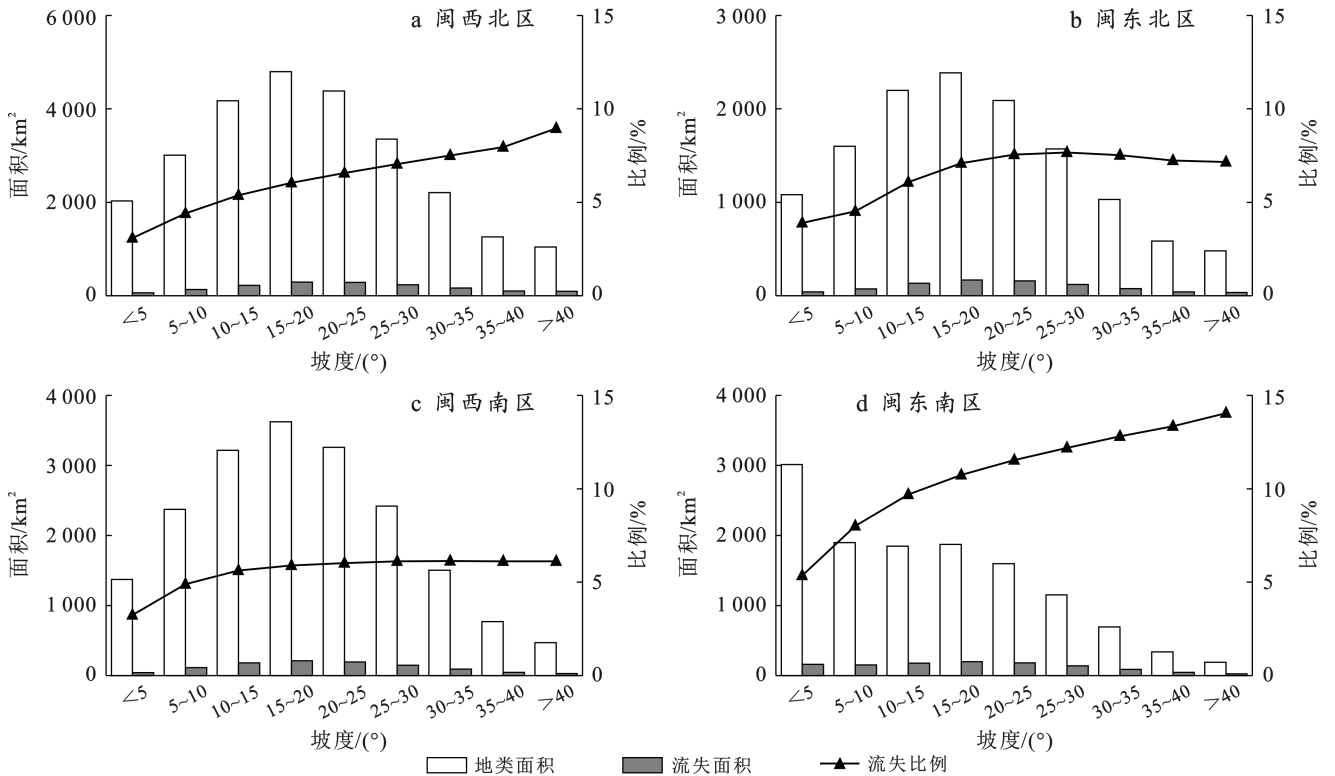


图 4 福建省不同坡度的地类面积、流失面积和流失比例

Fig.4 Areas of land use types, soil erosion area and soil erosion ratio at different slopes in Fujian Province

将福建省 4 个典型区域不同坡度地类、流失面积按照土地利用类型进行综合分析(如图 5 所示)。结果表明, 福建省耕地、建设用地、水域及水利设施用地主要分布在 20° 以下, 草地和交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 25° 以下, 园地主要分布在 30° 以下, 林地主要分布在 40° 以下, 其他用地主要分布在 10° 以上。

①闽西北区耕地、建设用地和水域及水利设施用地地类面积和流失面积主要分布在 20° 以下, 园地地类面积和流失面积主要分布在 30° 以下, 林地地类面积和流失面积主要分布在 5°~40° 范围内, 草地和交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 25° 以下, 其他用地地类面积主要分布在 10° 以上; ②闽东北区耕地、园地地类面积和流失面积主要分布在 25° 以下, 草地地类面积和流失面积主要分布在 30° 以下, 林地地类面积和流失面积主要分布在 5°~40° 范围

内, 建设用地、交通运输用地和水域及水利设施用地地类面积和流失面积主要分布在 20° 以下, 其他用地地类面积主要分布在 10° 以上; ③闽西南区耕地和建设用地地类面积和流失面积主要分布在 20° 以下, 园地地类面积和流失面积主要分布在 30° 以下, 林地地类面积和流失面积主要分布在 5°~35° 范围内, 草地、交通运输用地和水域及水利设施用地地类面积和流失面积主要分布在 25° 以下, 其他用地地类面积主要分布在 10° 以上; ④闽东南区耕地地类面积和流失面积主要分布在 10° 以下, 园地、草地地类面积和流失面积主要分布在 25° 以下, 林地地类面积和流失面积主要分布在 35° 以下, 建设用地地类面积和流失面积主要分布在 15° 以下, 交通运输用地地类面积和流失面积主要分布在 20° 以下, 水域及水利设施用地地类面积主要分布在 10° 以下, 其他用地地类面积主要分布在 5°~40° 范围内。

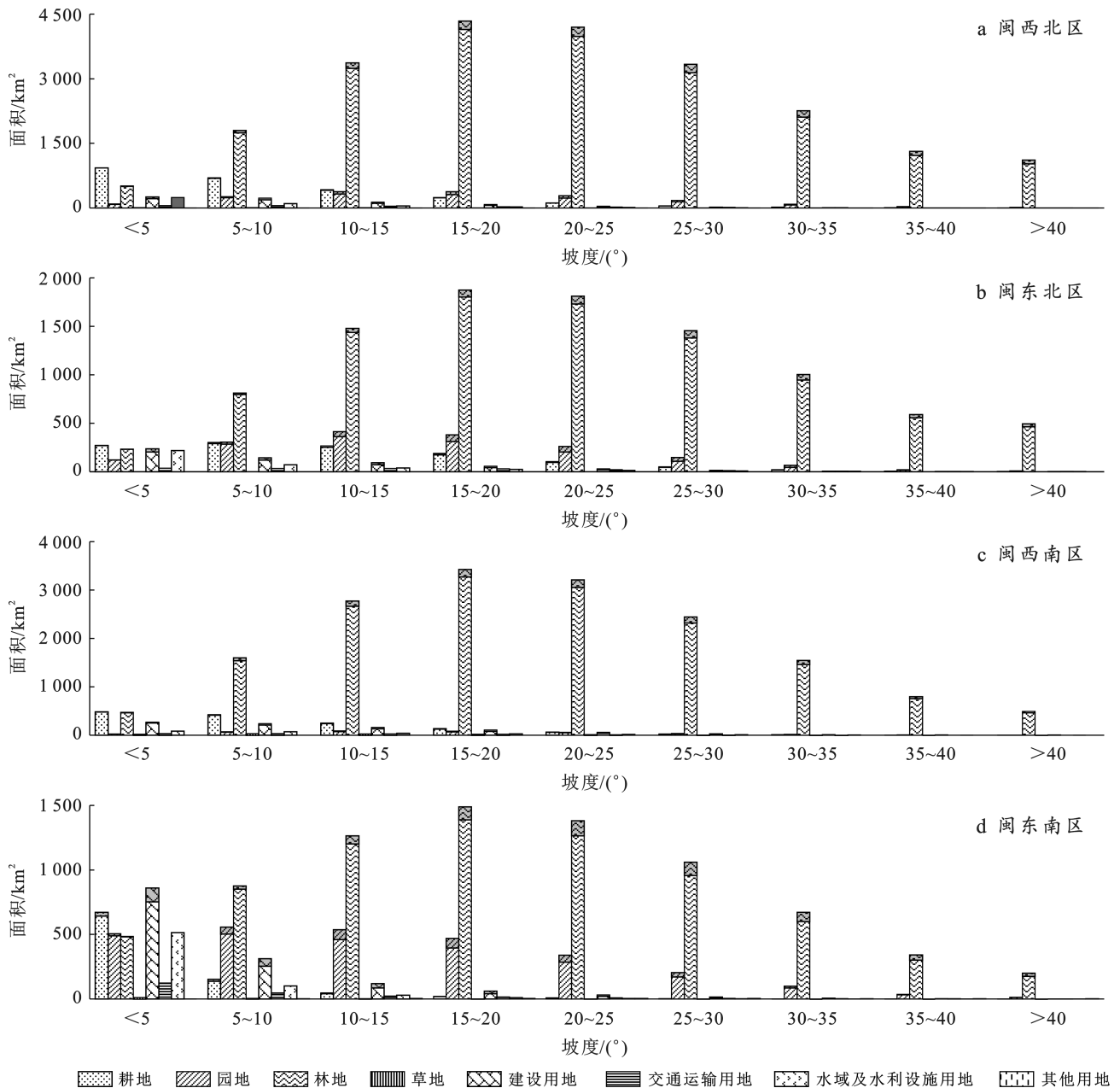


图5 福建省不同地类在不同坡度的地类面积和流失面积

Fig.5 Areas of different land use types and soil erosion at different slopes in Fujian Province

3.4 不同植被盖度水土流失特征

将植被盖度按照 $<30\%$, $30\% \sim 45\%$, $45\% \sim 60\%$, $60\% \sim 75\%$ 和 $\geq 75\%$ 分为低覆盖、中低覆盖、中覆盖、中高覆盖和高覆盖 5 个等级。4 个典型区域不同植被盖度的地类面积、流失面积和流失比例分布如图 6 所示。

由图 6 可知,福建省各区域总体植被盖度的地类面积和流失面积基本上是随植被盖度的增加而增加(闽东北区、闽西南区和闽东南区中低覆盖小于低覆盖),其中闽西北区随着植被盖度增大地类面积和流失面积分别增大 1.21~108.85 倍和 1.05~32.97 倍,闽东北区、闽西南区和闽东南区分别为 0.78~27.73 倍

和 0.73~6.17 倍、0.80~29.14 倍和 0.79~3.84 倍、0.85~15.12 倍和 1.04~13.99 倍;但闽西北区、闽东北区和闽西南区的流失比例均随植被盖度的增加而减少,降幅分别达到 13.59%~69.70%, 6.66%~77.76%, 1.75%~86.80%;而闽东南区的流失比例呈不同变化,随植被盖度增大流失比例呈先增大后递减变化,但整体差异较小,变化范围在 8.36%~11.43%。从 4 个区域分析,闽西北区植被盖度地类面积和流失面积随植被盖度的增加而增加,在高覆盖达到最大值,流失比例随植被盖度的增加逐渐减少,在低覆盖为最大值;闽东北区和闽西南区植被盖度地类面积和流失面积随植被盖度的增加先略微减

少后增加,在高覆盖达到最大值,流失比例随植被盖度的增加逐渐减少,在低覆盖为最大值;闽东南区植被盖度地类面积和流失面积随植被盖度的增加先略微减少后增加,在高覆盖达到最大值,流失比例随植被盖度的增加呈现出先增加后减少的趋势,在中覆盖达到最大值。植被盖度流失面积随植被盖度的增

加而增加的原因是植被覆盖度较高的林地主要分布在海拔和坡度较陡山区,而 CSLE 模型坡度比植被盖度对土壤流失计算影响更大,因此会计算出水土流失值。此外植被盖度较高区域面积也更大,所以计算得到的流失面积也更大,但是流失比例会比低植被盖度地区显著降低。

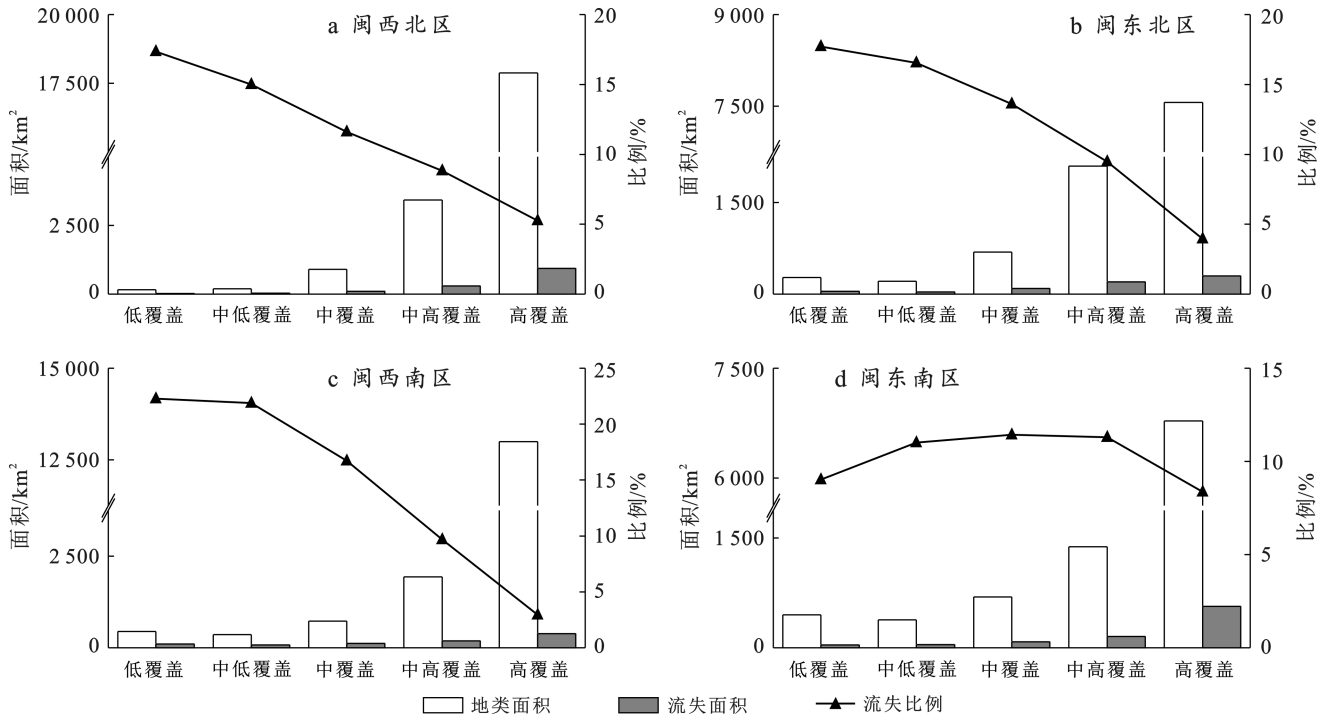


图 6 福建省不同植被盖度的地类面积、流失面积和流失比例

Fig.6 Areas of land use types, soil erosion area and soil erosion ratio under different vegetation coverage in Fujian Province

将植被盖度分别按照园地、林地、草地土地利用类型进行细化分析发现,福建省园地的地类面积和流失面积分布规律基本是从低覆盖到高覆盖逐渐增加。流失比例在不同区域上存在差异,其中闽西北区、闽东北区、闽西南区的园地流失比例从低覆盖到高覆盖逐渐降低,而闽东南区的园地流失比例从低覆盖到高覆盖逐渐增加,但闽东南区的园地流失比例相比其他 3 个区域显著较低。这可能是由于闽东南区园地面积较大,导致流失面积也较多,因此增加了对园地治理,降低了其水土流失比例。但是因为植被覆盖度较高地区主要分布在坡度较陡坡地,使其较高覆盖度园地流失比例相比于较低覆盖园地增加。福建省林地的地类面积和流失面积分布规律基本是从低覆盖到高覆盖逐渐增加,流失比例逐渐减少,主要是因为较高覆盖植被区域面积较多,但其受人类扰动较少,水土流失比例较低。草地的地类面积、流失面积和流失比例因为地类面积较小,无明显分布规律。

4 讨论

研究^[24]表明,不同土地利用方式由于受人为扰动和所处地形地貌有差异,导致其水土流失特征也有明显区别。福建省 4 个典型区域林地面积排 8 大类之首,基本占全部地类面积的 55% 以上,有些地区甚至超过 80%,但流失比例却很小,流失比例最高的闽东南区只有 7.62%,而园地、建设用地和草地的土地利用面积和流失面积均不高,但是流失比例平均在 20% 左右,最高可达 26.85%。因此开展水土保持治理工作需要重点针对流失比例较高的园地、建设用地和草地进行防治。主要是由于林地一般受人为扰动少,且大部分林地处于高海拔地区,经过长期的自然恢复,形成地表覆盖,增加渗透,进而减少水土流失^[25-26]。

从不同地类看,耕地在闽西北区、闽东北区、闽西南区的面积比例较高在 8% 左右,但闽东南区面积比例较低,主要是因为闽东南区可耕作用地主要开发为园地造成耕地面积较少^[7];园地在闽西南区面

积比例较小,而在闽东南区面积比例较大,主要是因为闽西南区林地面积比例高达84.12%,并且海拔 $<200\text{ m}$ 和坡度 $<5^\circ$ 面积较小,主要为陡峭山区,使得园地面积比例较小但流失比例为4个典型区域最高(26.85%)^[27]。而闽东南区园地海拔 $<200\text{ m}$ 和坡度 $<5^\circ$ 面积比例最大,主要为沿海平原,使其大力开发经济价值较高的茶果园。此外因为坡度较低,闽东南区的园地流失比例为4个典型区域最低(13.52%)。林地闽西北区、闽东北区、闽西南区的面积比例均在70%以上,主要是因为这3个区域分布有武夷山、玳瑁山、鹭峰山和太姥山等山脉,造成平均海拔和坡度较高,主要地类为林地。而闽东南区平均海拔和坡度较低,造成园地、建设用地的面积比例相比其他区域较大。草地、建设用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他用地也基本符合闽西北区、闽东北区、闽西南区较少、闽东南区较多的分布情况。上述分析也进一步表明,坡度、海拔和植被覆盖度等均会对水土流失造成影响^[13]。

从已有分析表明,CSLE模型在福建省4个典型区域的应用均能取得较好的效果。由模型得到的相关成果符合福建省的实际,因此可以作为侵蚀预测的模型。同时该模型目前为止也是中国开展历年水土流失动态监测的基础,可为长期和动态监测水土流失提供可靠技术支撑^[28],在中国东北黑土、黄土高原、北方土石山区、青藏高原、南方红壤区也都取得了显著成果^[29]。本研究基于CSLE模型实现了对区域水土流失的宏观评估,然而,模型参数的区域适用性与模拟精度仍需进一步验证。未来的研究工作可系统收集研究区的径流小区观测数据,对CSLE模型中的关键因子进行本地化率定与验证,从而优化模型参数,提升侵蚀模数估算的精度,并为构建更高精度的区域土壤侵蚀预测模型奠定基础。

5 结论

(1) 从不同地类看,福建省闽西北区、闽东北区、闽西南区和闽东南区均呈现出林地面积占总土地面积比例最高,均值达到73.36%,林地水土流失比例均值为5.51%。园地、草地和建设用地的水土流失比例较高,均值在16.98%~21.54%。

(2) 从海拔坡度看,福建省4个典型区域海拔主要分布在 $<1\ 000\text{ m}$ 范围内,其占地面积占总土地面积的比例平均达到92.96%,水土流失比例分布在5.15%~9.18%,闽东南区水土流失比例在1 200 m以上显著递增;坡度从西北向东南逐渐降低,均值在 $14.87^\circ\sim 19.82^\circ$,坡度 $\leq 35^\circ$ 占地面积占总土地面积比例

在91.24%~95.81%,流失比例在87.85%~93.91%。

(3) 从植被覆盖度看,地类面积和流失面积基本上是随着植被盖度的增加而增加。林地流失比例从低覆盖到高覆盖逐渐降低,园地流失比例除闽东南区域低覆盖到高覆盖逐渐增加,其他区域逐渐减少。

(4) 福建省需加强园地、草地和建设用地的水土流失治理工作,海拔、坡度、植被覆盖度等均会对土地利用类型分布面积和水土流失情况造成影响,不同区域需针对特定的水土流失特征进行针对性治理。

参考文献(References)

- [1] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits [J]. *Science*, 1995, 267(5201): 1117-1123.
- [2] 陈志强, 陈志彪, 陈明华. 福建省水土流失强度的地统计分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(8): 1394-1400.
Chen Zhiqiang, Chen Zhibiao, Chen Minghua. Geostatistical analysis on soil and water loss in Fujian Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1394-1400.
- [3] 石秀梅. 福建省重点治理区水土流失动态监测及治理效益研究[D]. 湖北 武汉: 武汉大学, 2019.
Shi Xiumei. Dynamic monitoring and control benefits of soil and water loss of key management areas in Fujian Province [D]. Wuhan, Hubei: Wuhan University, 2019.
- [4] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2013.
- [5] 曾舒娇, 汪小钦, 陈贤干, 等. 福建省水土流失的时空变化[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(6): 305-312.
Zeng Shujiao, Wang Xiaoqin, Chen Xiangan, et al. Temporal and spatial variation of soil erosion in Fujian Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(6): 305-312.
- [6] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在2025年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(1): 1-12.
Li Guoying. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 national water conservancy work conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 1-12.
- [7] 蒲朝勇. 深入推进水土保持碳汇工作 提升水土保持生态产品供给能力[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(3): 53-57.
Pu Chaoyong. Promoting carbon sink of soil and water conservation to further enhance the supply capacity of eco-

- logical products [J]. *Water Resources Development Research*, 2024,24(3):53-57.
- [8] 林敬兰,杨学震,陈明华,等.福建省土壤侵蚀遥感调查的方法和特点[J].*福建水土保持*,2001,13(4):56-60.
Lin Jinglan, Yang Xuezheng, Chen Minghua, et al. Methods and characteristics of remote sensing investigation of soil erosion in Fujian Province [J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 2001,13(4):56-60.
- [9] Liu Baoyuan, Xie Yun, Li Zhiguang, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(4):430-439.
- [10] Li Nian, Zhao Hongying, Luo Zhibang, et al. Soil erosion prediction in multiple scenarios based on climate change and land use regulation policies in context of sustainable agriculture [J]. *Catena*, 2024,247:108525.
- [11] Rao Wenli, Zhang Qingfeng, Zhang Fengbao, et al. An overview of water erosion modeling in China: A bibliometric and statistical analysis [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2025,12(2):337-354.
- [12] 陈贤干.福建省水土流失遥感监测[D].福建福州:福州大学,2015.
Chen Xiangnan. Remote sensing monitoring of soil erosion in Fujian Province [D]. Fuzhou, Fujian: Fuzhou University, 2015.
- [13] 王振平,汪小钦,曾舒娇,等.福建省水土流失现状分析[J].*水土保持通报*,2017,37(5):169-175.
Wang Zhenping, Wang Xiaoqin, Zeng Shujiao, et al. Analysis of soil and water loss in Fujian Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017,37(5):169-175.
- [14] 汪水前.基于CSLE的福建省闽清县水土流失动态监测与分析[J].*亚热带水土保持*,2019,31(4):49-52.
Wang Shuiqian. Dynamic monitoring and analysis of soil and water loss in Minqing County of Fujian Province based on CSLE [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2019,31(4):49-52.
- [15] 陆盛添.浅谈福建省屏南县水土流失现状及防治思路[J].*亚热带水土保持*,2012,24(4):40-43.
Lu Shengtian. Discussion on the present situation of soil erosion and its prevention and control in Pingnan County, Fujian Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2012,24(4):40-43.
- [16] 张信羌.浅谈新时期福建省闽侯县水土流失现状及工作思路[J].*亚热带水土保持*,2018,30(1):35-37.
Zhang Xinqiang. Discussion on the present situation and working ideas of soil erosion in Minhou County, Fujian Province in the new period [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2018,30(1):35-37.
- [17] 高德正.福建省南安市水土流失治理对策探究[J].*亚热带水土保持*,2020,32(4):32-35.
Gao Dezheng. Countermeasures for soil erosion control in Nan'an City, Fujian Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2020,32(4):32-35.
- [18] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].*地理科学*,2002,22(6):705-711.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,22(6):705-711.
- [19] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].*中国水土保持*,2013(10):26-34.
Liu Baoyuan, Guo Suoyan, Li Zhiguang, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):26-34.
- [20] 李经纬,赵静,吴仪邦,等.基于CSLE的汕头市土壤侵蚀定量分析研究[J].*水利水电技术*,2022,53(增刊1):118-122.
Li Jingwei, Zhao Jing, Wu Yibang, et al. Research on quantitative analysis of soil erosion in Shantou City based on CSLE [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022,53(Suppl.1):118-122.
- [21] 符素华,刘宝元,周贵云,等.坡长坡度因子计算工具[J].*中国水土保持科学*,2015,13(5):105-110.
Fu Suhua, Liu Baoyuan, Zhou Guiyun, et al. Calculation tool of topographic factors [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015,13(5):105-110.
- [22] 刘宝元,谢云.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.
Liu Baoyuan. Soil Loss Prediction Model [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [23] 郭索彦.土壤侵蚀调查与评价[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
Guo Suoyan. Investigation and Evaluation of Soil Erosion [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.
- [24] 朱婉菁,王克勤,宋娅丽,等.滇西北云龙县2000—2020年土壤侵蚀时空演变特征及影响因素[J].*水土保持学报*,2025,39(2):378-389.
Zhu Wanqing, Wang Keqin, Song Yali, et al. Temporal and spatial dynamics of soil erosion and its influencing factors in Yunlong County, northwest Yunnan Province from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025,39(2):378-389.
- [25] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.地表覆被格局优化对流域土壤侵蚀影响的模拟试验[J].*自然科学进展*,2004,14(11):1244-1248.
Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun, et al. Simulation experiment on the influence of surface cover pattern optimization on soil erosion in river basin [J]. *Progress in Natural Science*, 2004,14(11):1244-1248.

- [7] 王宝鹤,陆建国,文卓,等.基于退化剥离草皮的土壤重构技术[J].环境工程学报,2024,18(9):2577-2587.
Wang Baohe, Lu Jianguo, Wen Zhuo, et al. Soil reconstruction technology based on degraded stripped turfs [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(9):2577-2587.
- [8] 贺鹏.生态环保关键技术在山地风电项目建造中的应用研究[J].人民珠江,2023,44(S2):328-331.
He Peng. Research on the application of key ecological and environmental technologies in mountain wind power project construction [J]. Pearl River, 2023, 44(S2): 328-331.
- [9] 顾立海.北京冬奥会延庆赛区亚高山草甸保护与恢复技术研究[J].北方建筑,2023(4):55-59.
Gu Lihai. Research on the conservation and restoration techniques of subalpine meadows in the Yanqing competition area of the Beijing winter olympics [J]. Northern Architecture, 2023(4):55-59.
- [10] 高志成,田佳妮,霍艳双,等.切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响[J].生态学报,2017,37(11):3824-3829.
Gao Zhicheng, Tian Jiani, Huo Yanshuang, et al. Effects of root pruning and shallow plowing on soil properties and plant communities in deteriorated steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11):3824-3829.
- [11] Canale M C, Benato E A, Cia P, et al. In vitro effect of UV-C irradiation on *Guignardia citricarpa* and on postharvest control of citrus black spot [J]. Tropical Plant Pathology, 2011, 36(6):356-361.
- [12] Avila R, Schoenau J, King T, et al. Effects of subsoiling tillage on structure, permeability, and crop yields on compacted Solonchic and Chernozemic dryland soils in Western Canada [J]. Canadian Biosystems Engineer-
- ing, 2022, 62(1):1.1-1.9.
- [13] Mudrak O, Fajmon K, Jongepierova I, et al. Restoring species-rich meadow by means of turf transplantation: Long-term colonization of ex-arable land [J]. Applied Vegetation Science, 2017, 20(1):62-73.
- [14] Li Jie, Yang Hong, Zhou Feng, et al. Effects of maize residue return rate on nitrogen transformations and gaseous losses in an arable soil [J]. Agricultural Water Management, 2019, 211:132-141.
- [15] Wei Xiaoxuan, Li Yansu, Fan Xiaoguang, et al. Techno-economic feasibility of *in situ* vegetable residue return in the Chinese solar greenhouse [J]. Agronomy, 2021, 11(9):1828.
- [16] Emsens W J, Aggenbach C J S, Rydin H, et al. Competition for light as a bottleneck for endangered Fen species: An introduction experiment [J]. Biological Conservation, 2018, 220:76-83.
- [17] Holmgren M, Gomez-Aparicio L, Quero J L, et al. Non-linear effects of drought under shade: Reconciling physiological and ecological models in plant communities [J]. Oecologia, 2012, 169(2):293-305.
- [18] Petrov V, Hille J, Mueller-Roeber B, et al. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6:69.
- [19] 袁珩,杨文强.光合生物光抑制现象与光保护措施[J].植物生理学报,2023,59(4):705-714.
Yi Heng, Yang Wenqiang. Photoinhibition and photoprotection of photosynthetic organisms [J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(4):705-714.
- [20] Sullivan L L, Clark A T, Tilman D, et al. Mechanistically derived dispersal kernels explain species-level patterns of recruitment and succession [J]. Ecology, 2018, 99(11):2415-2420.

(上接第165页)

- [26] 王娟,刘晓林,亢庆,等.“县-小流域-图斑”多层次水土流失治理策略[J].农业工程学报,2025,41(7):136-144.
Wang Juan, Liu Xiaolin, Kang Qing, et al. Multi-level controlling of the soil erosion for counties, small watersheds, and plots [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(7):136-144.
- [27] 林子墨,王纪杰,唐张轩,等.红壤丘陵区种植茶树和柑橘对土壤肥力和水土流失的影响[J].福建农业科技,2024,55(9):17-22.
Lin Zimo, Wang Jijie, Tang Zhangxuan, et al. Effects of planting tea trees and citrus trees on soil fertility and soil and water loss in the red soil hilly region [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2024, 55(9): 17-22.
- [28] 刘忠仙,顾再柯,杜迪.新阶段贵州省水土流失动态监测工作思考[J].中国水土保持,2024(10):19-21.
Liu Zhongxian, Gu Zaike, Du Di. Thoughts on dynamic monitoring of soil erosion in Guizhou Province in the new stage [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(10):19-21.
- [29] 刁品文,曹珮,赵敏,等.基于CSLE模型的广州市水土流失及动态变化分析[J].人民珠江,2024,45(S1):19-28.
Diao Pinwen, Cao Pei, Zhao Min, et al. Analysis of soil erosion and dynamic change in Guangzhou based on CSLE model [J]. Pearl River, 2024, 45(S1):19-28.