

# 西藏地质灾害易发性及对水能开发适宜度影响

张玺国<sup>1</sup>, 周雄冬<sup>1</sup>, 徐梦珍<sup>1</sup>, 梁馨月<sup>2</sup>

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041)

**摘要:** 西藏自治区是中国水能资源的战略储备库与未来重点开发区域, 然而该区域地质灾害频发, 给水能开发带来极大挑战, 亟需系统研究。本文综合考虑西藏地区地质地貌、水文气象和植被覆盖等致灾因子, 基于最大熵(MaxEnt)模型分析泥石流、崩塌、滑坡等典型地质灾害的易发性, 结合水能资源分布禀赋, 实现西藏地区水能开发适宜度评价。结果表明, 雅鲁藏布江大拐弯羌纳一帮辛段水能开发适宜度最高, 可优先开发; 雅鲁藏布江上游夏如一拉孜段、怒江中游马利一林卡段、中林卡一察瓦龙段、支流伟曲河田妥一碧土段、澜沧江中游察雅一措瓦段、如美一盐井段、金沙江上段木协一戈波段、喜马拉雅山脉朋曲河流域为高水能开发高风险地区, 需谨慎开发; 雅鲁藏布江中游仁布一曲水段、易贡藏布忠玉一易贡段、察隅河下察隅以南段、朗钦藏布下游段为中水能开发低风险区, 可根据需求局部开发或暂缓开发; 其余区域水能开发适宜度较低, 不建议开发。本文针对西藏地区提出一种快速有效的水能开发适宜度评价体系, 可为该区域水能开发规划提供科学依据。

**关键词:** 西藏地区; 水能资源; 地质灾害易发性; 最大熵模型; 水能开发适宜度

DOI: 10.11821/dlxb202207003

## 1 引言

西藏自治区是雅鲁藏布江、怒江、独龙江等大江大河的发源地, 水资源量逾4300亿 $\text{m}^3$ , 占中国水资源总量约六成, 居全国首位<sup>[1]</sup>。该地区水能资源极其丰富, 理论蕴藏量逾2亿 $\text{kW}$ , 技术可开发量逾1.1亿 $\text{kW}$ , 是中国水能资源的战略储备库与未来重点开发区域<sup>[2]</sup>。“十四五”规划明确提出加强水利基础设施建设的要求, 并指出将建设雅鲁藏布江下游水电基地与金沙江上下游清洁能源基地<sup>[3]</sup>。然而, 西藏地区是地质灾害高发区。受亚欧板块和印度洋板块交界区剧烈构造运动影响<sup>[4]</sup>, 西藏地区河流侵蚀严重, 沟谷深切, 为地质灾害的发生提供了地质地貌条件<sup>[5]</sup>。同时, 西藏地区干湿季分明, 降水集中, 整体植被脆弱, 水土保持能力弱, 为地质灾害的发生提供了水沙输移条件<sup>[6-7]</sup>。特殊的自然环境与高灾害风险使该地区水利水电工程建设与运营面临极大挑战<sup>[8]</sup>。

地质灾害主要以泥石流流入库淤积<sup>[9]</sup>、库区崩塌涌浪<sup>[10]</sup>、滑坡涌浪<sup>[11]</sup>等形式影响水利水电工程。极端情况下的大规模灾害链造成巨大人员伤亡及财产损失<sup>[12-14]</sup>。目前, 针对泥石

收稿日期: 2021-07-09; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(SXXZ10315); 国家自然科学基金项目(41790403, 51639005) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0903; Scientific Research Project of Three Gorges Group Co. Ltd, No.SXXZ10315; National Natural Science Foundation of China, No.41790403, No.51639005]

作者简介: 张玺国(1997-), 男, 硕士生, 主要从事青藏高原地质灾害防控研究。E-mail: zhangxg20@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 徐梦珍(1986-), 女, 博士, 副教授, 主要从事河流地貌学、生态河流动力学、生物入侵及防治方面的研究。E-mail: mzxu@tsinghua.edu.cn

流、崩塌、滑坡等地质灾害的入库风险和危害已有丰富研究。机理层面上,前人以单个水库、小范围山区为研究对象,运用基于历史数据分析<sup>[15-16]</sup>、物理机理<sup>[17-18]</sup>的数值模拟、室内物理模型实验<sup>[19]</sup>等方法,发掘地质灾害的致灾因子和成灾机理,为地质灾害风险分析提供基础;区域评估层面上,形成了基于致灾因子和孕灾环境的地质灾害风险分析框架<sup>[20]</sup>,具体方法包括基于地质灾害历史调查资料和专家经验的定性分析法<sup>[21]</sup>、基于3S技术和机器学习的地理信息大数据定量分析法等<sup>[22]</sup>。其中,基于3S技术和机器学习的地理信息大数据定量分析法具有计算效率高、覆盖范围广的优势,且能够快速、准确地对大空间尺度的地质灾害易发性进行量化评估<sup>[23]</sup>。

已有研究基于3S技术和统计分析手段,就中国部分地区的地质灾害易发性问题进行了探讨,如:崔鹏等基于文献调研资料、气象数据集及实测灾害数据,运用层次分析法对青藏高原的滑坡泥石流、山洪、干旱和雪灾进行致灾因子危险性评估、承灾体易损性评估和灾害易发性综合评估<sup>[24]</sup>;杨淞月等基于地层岩性、坡度、坡向、高程等地质地貌数据,运用信息量叠加模型对湖北省西南部山区的滑坡灾害易发性进行量化<sup>[25]</sup>;梅鸿儒基于地形地貌、水文气象和工程开挖施工等数据资料,运用多级模糊评判法和层次分析法,对云南省公路边坡的滑坡灾害易发性进行评估<sup>[26]</sup>;Chang等运用反向传播的人工神经网络算法,对中国台湾地区的泥石流灾害进行易发性预测<sup>[27]</sup>;赵岩等运用人工智能算法,对青藏高原东边缘白龙江流域的低频泥石流沟(LFDs)进行自动识别等<sup>[28]</sup>。

基于上述地质灾害的风险性与危害性研究基础,本文进一步探讨和评估地质灾害影响下的水能开发的适宜性。本文以“致灾因子—孕灾环境”综合评价体系为核心框架,综合西藏地区的地质地貌、水文气象和植被覆盖等环境资料和有明确观测记录的地质灾害资料,运用最大熵(MaxEnt)模型,对该地区的3类典型地质灾害——泥石流、崩塌、滑坡进行易发性分析。在此基础上,结合西藏地区的水能资源空间分布现状,提出一种综合考虑地质灾害易发性的水能开发适宜度评价方法,揭示西藏地区水能开发适宜度分布与变化规律,提出水能开发建议。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

(1) 气象水文:年降水分布数据取自中国科学院资源与环境数据中心(2015年),空间分辨率1000 m;站点径流数据取自《中华人民共和国水文年鉴》(1956—2016年)。

(2) 地质地貌:地形高程数据取自美国SRTM的90 m DEM数据,用于计算坡度、坡向数据;地层岩性数据取自中国科学院资源与环境数据中心([www.resdc.cn](http://www.resdc.cn));河网数据取自<https://www.hydrosheds.org>,用于计算距河网距离;冰川分布数据取自国家青藏高原科学数据中心,用于计算距冰川距离。

(3) 人类活动:居民点分布数据取自地理国情普查公开数据(2015年),用于计算距居民点距离;道路与铁路分布数据均取自Open Street Map(2020年),用于计算距道路、铁路距离。

(4) 植被覆盖:NDVI数据为MODIS产品(2000—2019年),空间分辨率250 m,用于表征植被覆盖。

(5) 地质灾害点:数据来源于中国科学院资源与环境数据中心,具体包括西藏地区已发生的泥石流点4570个、崩塌点1185个、滑坡点1343个等的灾害发生位置、受影响的人员财产量及灾害等级信息等。

## 2.2 数据预处理

(1) 岩体性质参数化：根据工程地质岩组对岩体进行划分并参数化赋值<sup>[29]</sup>（表1）。岩体硬度越高，抗侵蚀能力越强，赋值越高。对组分复杂的岩组，其赋值以岩性组成中的最低硬度为准。

(2) 距离栅格计算：对于居民点、道路与铁路、冰湖及河网分布等矢量数据，采用“路径距离”法，以西藏DEM数据为参考表面计算得到各像元在三维坐标系下与矢量数据的距离栅格。

## 2.3 最大熵模型

信息熵概念由香农（Shannon C E）最早提出，用以表征信息的不确定程度，与热力学概念中的熵相反，信息熵越大系统越稳定。一组离散随机变量的信息熵在约束条件下达到最大时，即得到其最可能的概率分布<sup>[30]</sup>。本文运用最大熵（MaxEnt）模型，以西藏地区地质地貌、水文气象、植被覆盖等环境条件作为约束，计算泥石流、崩塌、滑坡发生概率分布：

$$H(Y|X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \sum_{j=1}^m p(y_j|x_i) \lg p(y_j|x_i) \quad (1)$$

式中： $Y$ 为地质灾害发生概率分布； $X$ 为环境条件。本文中MaxEnt模型的输出结果即为在西藏地区环境条件下最可能的地质灾害易发性分布。

MaxEnt模型的有效性通过ROC曲线和对应AUC值进行评价。本文使用十折交叉验证法进行数据训练集和验证集的随机循环划分，在训练模型的同时进行验证。验证通过后，运用MaxEnt模型对西藏地区泥石流、崩塌、滑坡3类典型地质灾害的易发性概率进行预测。将地质灾害易发性分为5级：极低易发性（ $< 0.1$ ）、低易发性（ $0.1\sim 0.3$ ）、中易发性（ $0.3\sim 0.5$ ）、高易发性（ $0.5\sim 0.7$ ）和极高易发性（ $> 0.7$ ）。

基于西藏地区地质灾害的孕灾环境和成灾特点，选取高程、坡度、坡向、地层岩性、年降水、NDVI、距河网距离、距冰湖距离、距公路距离和距铁路距离等10类易发性评价因子，作为训练MaxEnt模型的输入环境条件，有观测记录的地质灾害点数据作为对应输入目标。

## 2.4 水能资源估算

基于清华大学自主研发的水文水力预报平台HHFS<sup>[31]</sup>，以DEM数据和站点径流数据为基础，在子流域单元上对西藏地区的水能资源进行估算：

$$SP_l = \gamma Q_l h_l \quad (2)$$

式中： $SP_l$ 为目标子流域单元中河段 $l$ 上的水能功率（W）； $\gamma$ 为水体容重（ $9800 \text{ N/m}^3$ ）； $Q_l$ 为河段 $l$ 上的平均断面流量（ $\text{m}^3/\text{s}$ ）； $h_l$ 为河段 $l$ 入流断面和出流断面的水面高程差（m）。藏西北羌塘高原内流区水系难以通过“D8最大坡降单流向算法”正确提取，且该区域水能资源一般较低不具开发价值<sup>[32]</sup>，因此对该区域进行了赋低值处理。

## 2.5 考虑地质灾害易发性的水能开发适宜度

综合西藏地区典型地质灾害易发性和水能资源分布现状，本文提出一种考虑地质灾害易发性的水能开发适宜度计算方法：

$$E_l = (1 - p_h) \times SP_l \quad (3)$$

式中： $E_l$ 为目标子流域单元中河段 $l$ 上的可安全开发水能功率（W）； $p_h$ 为某一类地质

表1 岩性参数化赋值表<sup>[29]</sup>

岩体	赋值
花岗岩、石英岩、石英砂岩等	5
钙质砂岩、白云岩、石灰岩、板岩等	4
千枚岩、泥灰岩、砂质泥岩等	3
页岩、泥岩、泥质砂岩等	2
沉积物、冰碛物、碎屑岩等	1
水体、雪被区等	0

灾害易发概率； $SP_i$ 为式(2)所得。在泥石流、崩塌、滑坡3类典型地质灾害共同影响下，认为综合可安全开发水能为各类地质灾害对应可安全开发水能的最小值。对西藏地区各像元的综合可安全开发水能进行归一化处理，即得到该地区考虑地质灾害易发性的水能资源开发适宜度分布。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 西藏地区地质灾害易发性

西藏地区泥石流、崩塌、滑坡3类典型地质灾害的易发性分布如图1所示，模型ROC曲线如图2所示。3类地质灾害易发性模型的AUC值分别为0.887、0.876和0.925，均具有良好的预测效果。3类地质灾害易发性等级的区域面积占比如表2所示，综合易发性分布如图3所示，综合易发性等级划分标准及各等级面积占比如表3所示。崩塌灾害的高、极高易发区分布较广(13.71%)，泥石流灾害次之(10.2%)，滑坡灾害分布范围相对较小(8.3%)。泥石流—滑坡高、极高易发区占西藏地区总面积的3.44%，泥石流—崩塌高、极高易发区占5.02%，崩塌—滑坡高、极高易发区占4.19%。具有一类或多类地质灾害的高、极高易发区占西藏地区总面积的17.17%。3类地质灾害的高、极高易发区重合区域较多，占西藏地区地质灾害高、极高易发区面积的29.97%，占西藏地区总面积的5.15%。从流域水系分布看，3类地质灾害的共同高、极高易发区集中于怒江中游、雅鲁藏布江中游；从地形地貌分布看，集中于唐古拉山脉、他念他翁山脉、岗日嘎布、伯舒

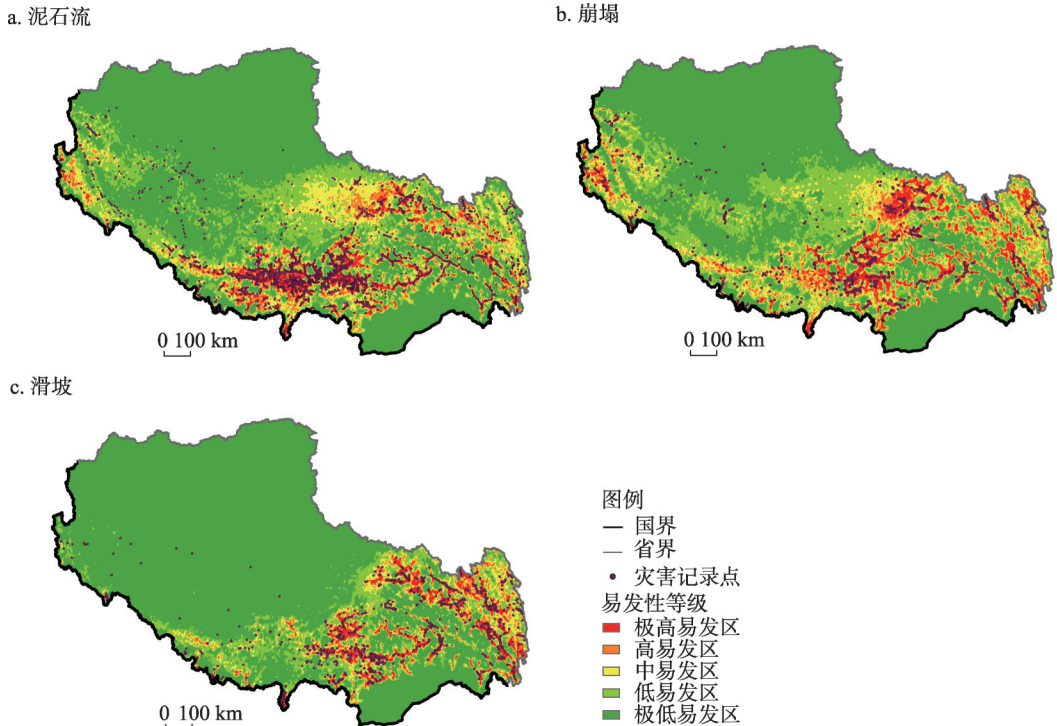


图1 西藏泥石流、崩塌、滑坡3类典型地质灾害易发性分布预测

Fig. 1 Geo-hazard susceptibility predictions for debris flow, avalanche and landslide in Tibet

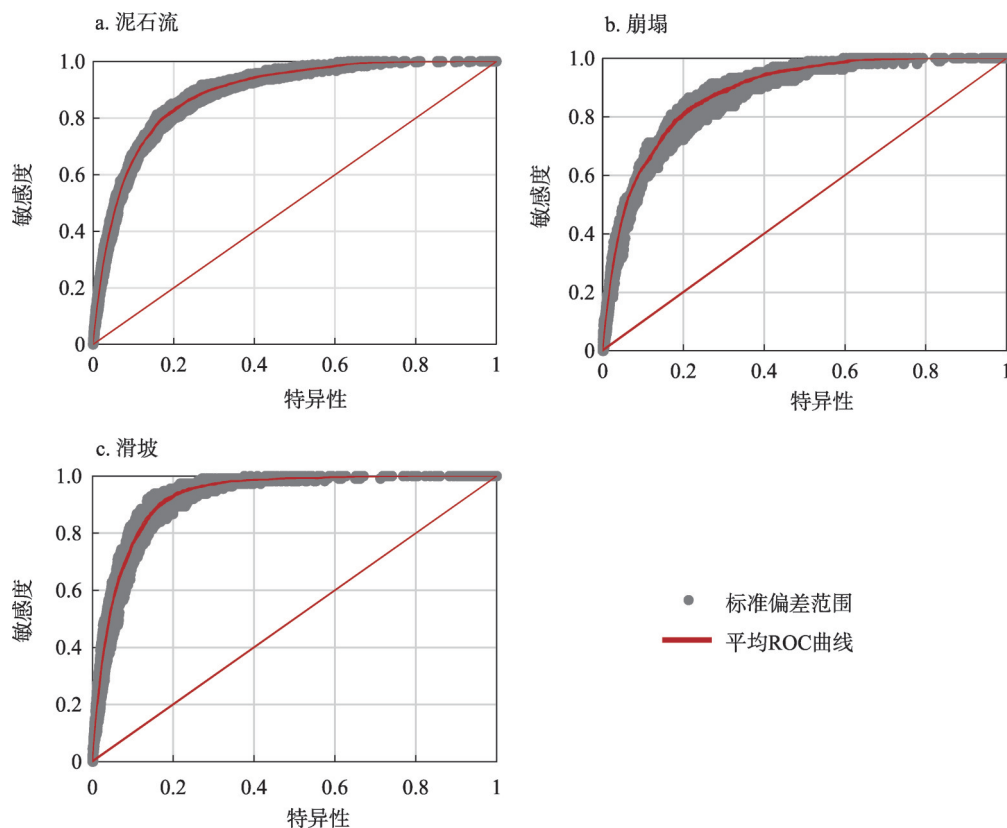


图2 ROC曲线表征的预测模型表现

Fig. 2 Performance of prediction model characterized by ROC curves for debris flow, avalanche and landslide

拉岭、芒康山与冈底斯山脉，喜马拉雅山脉亦有分布。从泥石流、崩塌、滑坡的孕灾环境判断，西藏地区中部和东南部高山峡谷区地形起伏剧烈，沟谷密集，且冰川侵蚀与水流下切作用强，具备地质灾害的诱发条件。

泥石流、崩塌灾害的高、极高易发区在空间分布上亦存在一定差异性。除上述共同分布区外，泥石流灾害的高、极高易发区在雅鲁藏布江上游、藏北高原阿伊拉日居山区分布较为广泛；崩塌灾害的高、极高易发区分布于念青唐古拉山脉以北那曲河、卡曲河流域。

### 3.2 地质灾害易发性模型致灾因子重要性

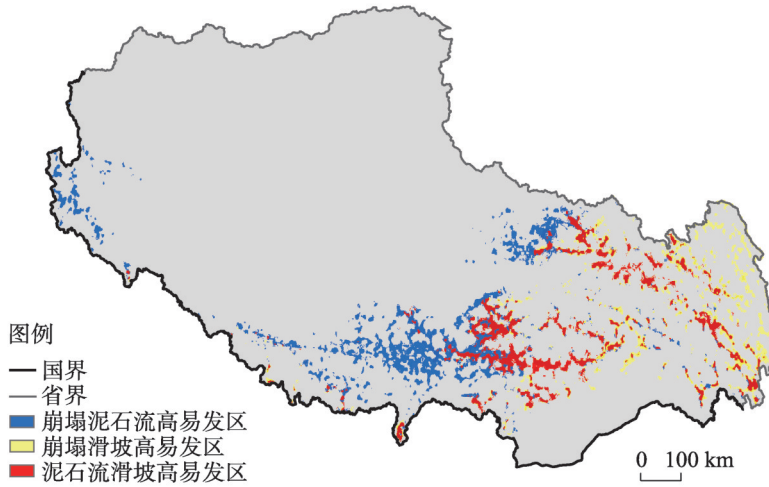
如图4所示，在泥石流灾害易发性模型中，距河网距离、高程的重要性均超过20%；坡度、距公路距离的重要性占比在10%~20%之间；距冰川距离、降水、距铁路距离的重要性占比在1%~10%之间；NDVI、坡向的重要性占比均低于1%。在崩塌灾害易发性模型中，距河网距离的重要性均占比较大，超过30%；距公路距离、坡度的重要性

表2 泥石流、崩塌、滑坡3类地质灾害不同易发性等级面积占比(%)

Tab. 2 The proportion of areas with different susceptibility levels for debris flow, avalanche and landslide to the total area of Tibet (%)

易发风险等级	泥石流	崩塌	滑坡
极高易发性	5.34	6.93	4.38
高易发性	4.86	6.78	3.92
中等易发性	9.21	11.03	5.83
低易发性	22.22	22.52	11.47
极低易发性	58.37	52.74	74.40

a. 二类灾害易发性



b. 综合易发性

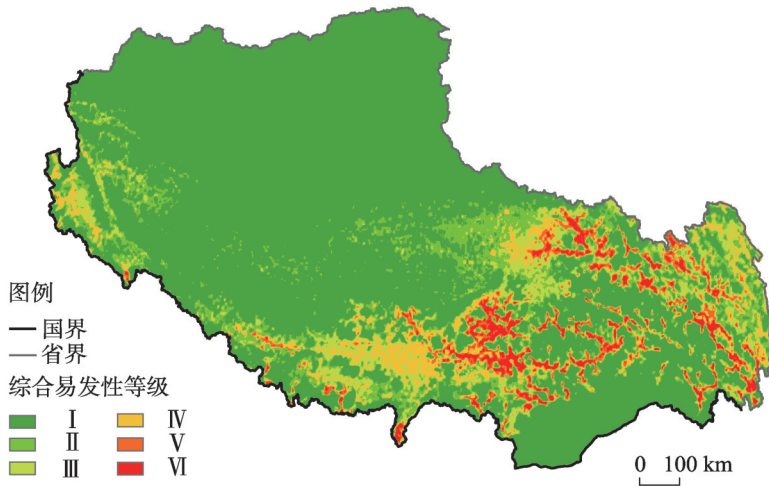


图3 西藏地区3类典型灾害综合易发性分布

Fig. 3 Distribution of integrated susceptibility for debris flow, avalanche and landslide in Tibet

占比在10%~20%之间；距冰川距离、高程、降水、距铁路距离、岩性、NDVI的重要性占比在1%~10%之间，坡向的重要性占比低于1%，而对于滑坡灾害易发性模型而言，降水、距河网距离的重要性均占比较大，超过20%；距公路距离、高程、坡度的重要性占比在10%~20%之间；距冰川距离、NDVI、岩性的重要性占比在1%~10%之间，坡向、距铁路距离的重要性占比均低于1%。

表3 综合易发性等级标准及各等级面积占比(%)

Tab. 3 Standard of integrated susceptibility levels and the proportions of area at each level to the total area of Tibet (%)

综合易发性等级	标准	面积占比
VI	3类地质灾害均为极高易发性	2.20
V	3类地质灾害均为高易发性或以上	2.94
IV	两类地质灾害为高易发性或以上	4.75
III	一类地质灾害为高易发性或以上	7.28
II	3类地质灾害均为中易发性或以下	11.17
I	3类地质灾害均为低或极低易发性	71.66

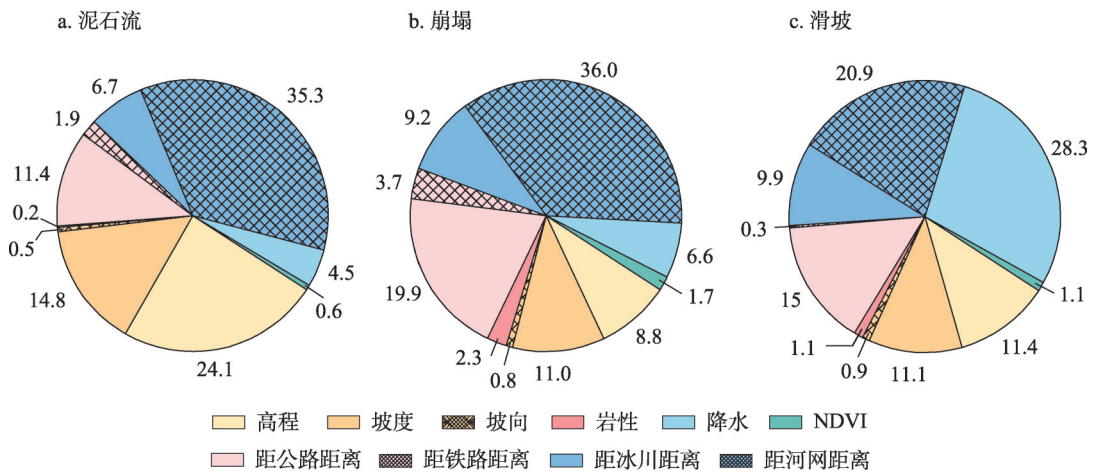


图4 MaxEnt模型预测结果中输入变量重要性占比(%)

Fig. 4 The proportion of the importance of input variables for the MaxEnt model (%)

对各致灾因子在3类地质灾害的易发性预测中的重要性分析发现，距河网距离在3类地质灾害模型中的重要性均较高，说明河流分布在致灾因子中占主导地位<sup>[33]</sup>。针对崩塌和滑坡灾害，距公路距离的重要性占比较高，说明公路修建时的边坡开挖、爆破等活动对崩塌、滑坡的成灾影响较大<sup>[34]</sup>；坡度、高程作为地形地势因素，在3类地质灾害易发性预测中重要性占比均较高，是西藏地区地质灾害的主要影响因素；降水在滑坡易发性预测中起到了主要作用，表明西藏地区降水导致的侵蚀和土壤含水率改变对滑坡的成灾有着重要影响。结合3类地质灾害易发区的空间分异，认为雅鲁藏布江上游夏如一拉孜段地区主要受河流侵蚀和区域内公路修建影响导致泥石流高易发；怒江中游、澜沧江中游、金沙江上段区域则由于受海洋性气候影响更加显著，降水更加集中，更易发育崩塌灾害；此外，由于该3个河段流经横断山区，地形起伏更加剧烈，坡度和高程的影响更大，更易发育高位滑坡。

一般认为植被保护可降低坡面侵蚀，一定程度缓解泥石流或浅层滑坡灾害<sup>[35]</sup>。但本文中，NDVI对西藏地区灾害易发性模型的重要性极低，一方面高寒高海拔区植被覆盖度低，且高寒草原群落的根系直径较细<sup>[6]</sup>，水土保持作用普遍较弱；另一方面地形急变带重力侵蚀严重，植被能够发挥的作用显得比较微弱，因此地质灾害易发性评价中植被覆盖不是主要因子。需说明的是，实际情况下各个致灾因子互相影响，难以完全排除各因子间的自相关性。

### 3.3 地质灾害易发性对西藏地区水能开发适宜度分布的影响

西藏地区水能资源分布呈现出西北低、东南高的基本态势（图5）。结合自然断点法分类结果，将西藏地区水能功率超过400 MW的河段划为高水能河段，低于5 MW划为低水能河段。结果表明，高水能河段主要包括：雅鲁藏布江大拐弯羌纳一帮辛段（约110 km）、上游夏如一拉孜段（约100 km）、下游墨脱一里夏段（约70 km），怒江中游马利一林卡段（约100 km）、中林卡一察瓦龙段（约80 km）、支流伟曲河田妥一碧土段（约150 km），澜沧江中游察雅一措瓦段（约70 km）、如美一盐井段（约80 km），金沙江上段甲英一拉哇段（约80 km）、以及朋曲河流域（约50 km）等；中水能河段主要包括雅鲁藏布江中游仁布一曲水段（约80 km）、易贡藏布忠玉一易贡段（约50 km）、察隅河下察隅以南段（约50 km）、朗钦藏布下游段（约50 km）等。

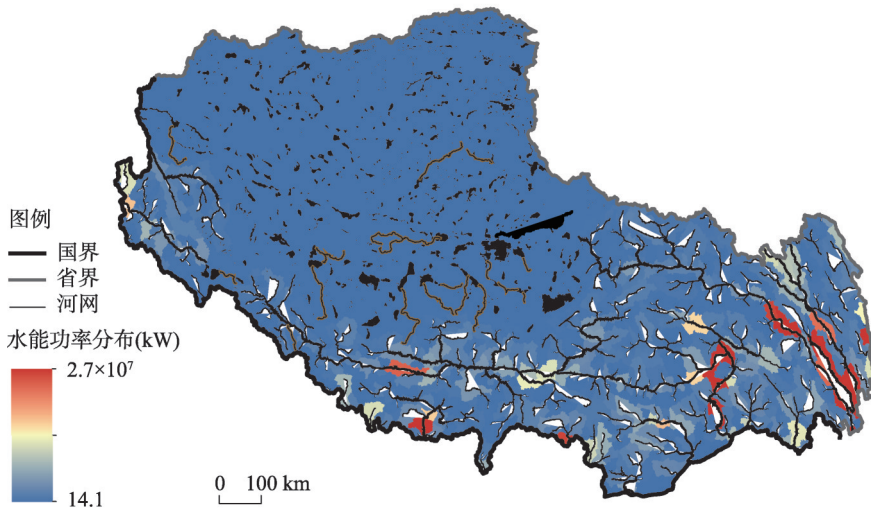


图5 西藏地区水能分布

Fig. 5 Distribution pattern of hydropower storage in Tibet

西藏地区总体水能开发适宜度分布如图6所示。结果显示，西藏高水能区与地质灾害易发区重合较大，受地质灾害风险影响，可安全开发的流域面积较高水能区面积明显减小。如，怒江中游马利—林卡段、中林卡—察瓦龙段、怒江支流伟曲河田妥—碧土段、澜沧江干流中游察雅—措瓦段、如美—盐井段、金沙江干流木协—戈波段等的水能蕴藏丰富，但受河流侵蚀、横断山区地形地貌、降水、公路修建等因素影响，崩滑泥石流等地质灾害易发性高，水能开发适宜度受到明显限制。

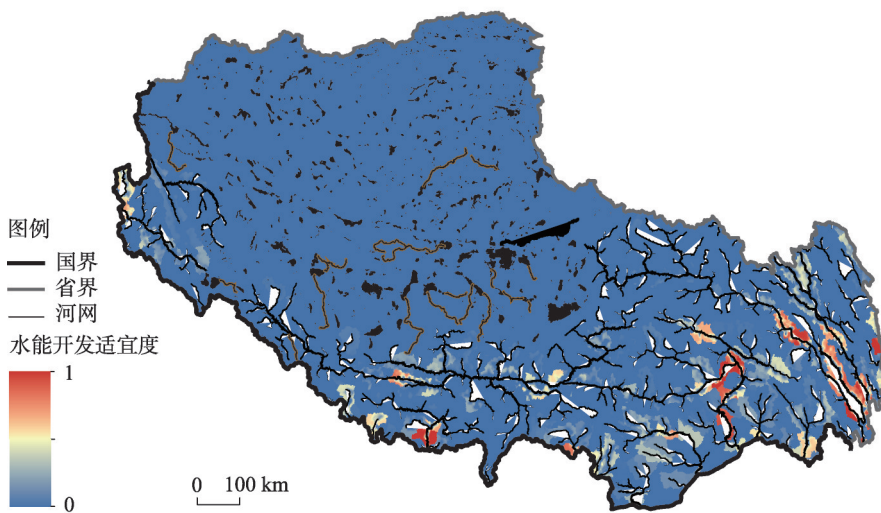


图6 西藏地区水能开发适宜度分布

Fig. 6 Distribution pattern of hydropower development suitability in Tibet

基于泥石流、崩塌、滑坡易发性结果,西藏地区水能开发适宜度高值(0.7~0.9)集中分布于雅鲁藏布江大拐弯羌纳一帮辛段,属高能量中低风险区域;水能蕴藏量较高的雅鲁藏布江上游夏如一拉孜段、怒江中游马利一林卡段、中林卡一察瓦龙段、支流伟曲河田妥一碧土段、澜沧江中游察雅一措瓦段、如美一盐井段、金沙江上段木协一戈波段和朋曲河等,受地质灾害影响水能开发适宜度出现了显著的下降,值为0.4~0.7,属高能量高风险区域;雅鲁藏布江中游仁布一曲水段、易贡藏布忠玉一易贡段、察隅河下察隅以南段、朗钦藏布下游段水能开发适宜度受地质灾害影响较小,在0.4~0.7,属中能量低风险区域;低水能河段水能开发适宜度普遍低于0.4。综合考虑水电经济效益和坝库工程安全,建议优先开发西藏高能量中低风险地区水能,对高能量高风险地区需谨慎开发,中能量低风险地区根据需要局部开发或暂缓开发,其余低能量地区不建议独立开发。

## 4 结论与展望

本文基于机器学习技术和信息熵理论,结合西藏地区历史地质灾害记录和环境条件,分析区内泥石流、崩塌、滑坡3类地质灾害的易发性,并结合水能资源空间分布,对地质灾害影响下的全区水能资源开发适宜度进行评估。

西藏地区中部、东南部的高山峡谷区为泥石流、崩塌、滑坡3类地质灾害的高、极高易发区。河流与冰川侵蚀、公路修建、降水、坡度等是西藏地区泥石流、崩塌、滑坡的主要致灾因子,植被覆盖、铁路修建与坡向对易发性的影响相对较低。在水能资源分布和地质灾害易发性的综合考量下,雅鲁藏布江大拐弯羌纳一帮辛段属高水能中低风险区域,水能开发适宜度最高,可优先开发;雅鲁藏布江上游夏如一拉孜段、怒江中游马利一林卡段、中林卡一察瓦龙段、支流伟曲河田妥一碧土段、澜沧江中游察雅一措瓦段、如美一盐井段、金沙江上段木协一戈波段、喜马拉雅山脉朋曲河流域属高水能高风险区域,需谨慎开发;雅鲁藏布江中游仁布一曲水段、易贡藏布忠玉一易贡段、察隅河下察隅以南段、朗钦藏布下游段属中水能低风险区域,可根据需要局部开发或暂缓开发;其余地区水能开发适宜度均较低,不宜进行开发。

本文结果可为西藏地区全域水能开发提供战略依据。局部区域的水能开发可行性需更为深入全面的模型模拟和论证。水能作为一种清洁能源,是中国碳中和目标的重要助力,在高异质性的自然环境下“因地制宜”,进行“低风险、小破坏”的水能开发具有广阔的研究前景。

致谢:感谢三峡集团西藏能源投资有限公司滕龙、刘垣对论文撰写及修改提供的帮助。

## 参考文献(References)

- [1] Shao Qingwei. The research on management and integrated utilization of water resource on Tibet Autonomous region [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. [邵青伟. 西藏自治区水资源管理及综合利用规划研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.]
- [2] Zhang Hongwu. Discussion on the development and utilization of water in Tibet. *Water Resources Planning and Design*, 2011(1): 1-4. [张红武. 西藏之水开发利用问题的探讨. *水利规划与设计*, 2011(1): 1-4.]
- [3] Xinhua News Agency. Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and Vision 2035 of the People's Republic of China. *China Water Resources*, 2021(6): 1-38. [新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. *中国水利*, 2021(6): 1-38.]
- [4] Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, et al. Discussion on the era, amplitude and form of the uplift of the Qinghai Tibet Plateau. *Scientia Sinica*, 1979, 9(6): 608-616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. *中国科学*, 1979, 9(6): 608-616.]

- [5] Li Zhiwei, Yu Guoan, Xu Mengzhen, et al. Progress in studies on river morphodynamics in Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Water Science*, 2016, 27(4): 617-628. [李志威, 余国安, 徐梦珍, 等. 青藏高原河流演变研究进展. *水科学进展*, 2016, 27(4): 617-628.]
- [6] Wu Yijin, Zhao Xingshuang, Xi Yue, et al. Comprehensive evaluation and spatial-temporal changes of eco-environmental quality based on MODIS in Tibet during 2006-2016. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1438-1449. [吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于MODIS的2006—2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1438-1449.]
- [7] Wang Shijin, Wei Yanqiang, Niu Chunhua, et al. Comprehensive risk management of multiple natural disasters on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 46(6): 1848-1860. [王世金, 魏彦强, 牛春华, 等. 青藏高原多灾种自然灾害综合风险管理. *冰川冻土*, 2021, 46(6): 1848-1860.]
- [8] Shao Yan. Risk analysis of water conservancy project construction in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. [邵妍. 青藏高原地区水利工程建设风险分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.]
- [9] Wang Zhoue, Wang Yingkui. Basic characteristics and control measures of debris flow in Dasi valley of Liujiuxia reservoir. *Express Water Resources & Hydropower*, 2021, 42(3): 18-22. [王周粤, 王英奎. 刘家峡水库大寺沟泥石流基本特征与防治对策. *水利水电快报*, 2021, 42(3): 18-22.]
- [10] Huang Bolin, Yin Yueping, Li Bin, et al. Study on landslide surge risk assessment and disaster reduction in cities and towns in the reservoir area. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1949-1961. [黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究. *地质学报*, 2021, 95(6): 1949-1961.]
- [11] Yu Zhengxing, Sun Ning. Study on critical pool level causing landslide instability near dam bank. *Technical Supervision in Water Resources*, 2021(11): 157-163. [余政兴, 孙宁. 引发某近坝库岸滑坡失稳临界蓄水位研究. *水利技术监督*, 2021(11): 157-163.]
- [12] Shen Ying. Analysis of the causes of landslide and study on reinforcement treatment of a hydropower station project. *Yunnan Water Power*, 2020, 36(8): 61-65. [沈英. 某水电站工程滑坡成因分析及加固处理研究. *云南水力发电*, 2020, 36(8): 61-65.]
- [13] Yang Rihong, Yang Jinzhong, Wang Zhihua. The remote sensing image information interpretation and mechanism of Qianjingping landslide in three gorges. *Earth and Environment*, 2007, 35(1): 85-90. [杨日红, 杨金中, 王治华. 千将坪滑坡特征信息遥感提取及滑坡成因机理分析. *地球与环境*, 2007, 35(1): 85-90.]
- [14] Wen Liangyou, Cai Pin. Prediction and prevention of geological hazards in reservoir influence area of Xiluodu hydropower station. *Water Power*, 2018, 44(1): 94-97. [文良友, 蔡频. 溪洛渡水电站水库影响区地质灾害的预测预防. *水力发电*, 2018, 44(1): 94-97.]
- [15] Yin Yueping, Zhang Chenyang, Yan Hui, et al. Research on seepage stability and prevention design of landslides during impoundment operation of the Three Gorges Reservoir, China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(4): 649-659. [殷跃平, 张晨阳, 闫慧, 等. 三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(4): 649-659.]
- [16] An Dong, Song Kun, Yi Zheng, et al. A prediction model for reservoir landslide step-like displacements using combined EEMD and RFR Method. *Mountain Research*, 2021, 39(1): 143-150. [安冬, 宋琨, 仪政, 等. 一种基于EEMD-RFR的水库滑坡台阶状位移预测模型. *山地学报*, 2021, 39(1): 143-150.]
- [17] Xu W J, Yao Z G, Luo Y T, et al. Study on landslide-induced wave disasters using a 3D coupled SPH-DEM method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(1): 467-483.
- [18] Sun Changrui. Risk assessment and engineering impact of debris flow in dam site area of Benzilan hydropower station on Jinsha River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. [孙长瑞. 金沙江奔子栏水电站坝址区泥石流危险性评价及工程影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.]
- [19] Tian Ye. Experimental study on the effect of the landslides surge on bridges in mountainous river type reservoirs [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. [田野. 山区河道型水库滑坡涌浪对桥梁作用的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.]
- [20] Yang Liu, Mu Xinliang, Li Chen, et al. Risk assessment of geological hazards in Baota district, Yan'an city, Shaanxi, China. *Mountain Research*, 2020, 38(5): 679-690. [杨柳, 牟鑫亮, 李晨, 等. 延安市宝塔区地质灾害风险评价. *山地学报*, 2020, 38(5): 679-690.]
- [21] Jiang Siyi, Li Chunling, Li Hailiang, et al. Evaluation of geological hazard prone zone based on GIS in Beiliu city, Guangxi mineral exploration, 2020, 11(6): 1314-1320. [江思义, 李春玲, 李海良, 等. 基于GIS的广西北流市地质灾害易发性分区评价. *矿产勘查*, 2020, 11(6): 1314-1320.]

- [22] Tian Shuwen, Study on rainfall threshold and risk evaluation of debris flow: A case on Dawa Gully [D]. Changchun: Jilin University, 2017. [田书文. 泥石流的物源降雨启动模拟及危险性评价: 以密云县大洼沟为例[D]. 长春: 吉林大学, 2017.]
- [23] Xu Shenghua, Liu Jiping, Wang Xianghong, et al. Landslide susceptibility assessment method incorporating index of entropy based on Support Vector Machine: A case study of Shaanxi Province. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(8): 1214-1222. [徐胜华, 刘纪平, 王想红, 等. 熵指数融入支持向量机的滑坡灾害易发性评价方法: 以陕西省为例. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(8): 1214-1222.]
- [24] Cui Peng, Su Fenghuan, Zou Qiang, et al. Risk assessment and mitigation countermeasures of mountain and meteorological disasters in Qinghai-Tibet Plateau. *Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3067-3077. [崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地地质灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. *科学通报*, 2015, 60(32): 3067-3077.]
- [25] Yang Songyue, Weng Maozhi, Tian Hua, et al. Landslide risk evaluation in the urban area in Hefeng county, Hubei province. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(1): 144-155. [杨淞月, 翁茂芝, 田华, 等. 湖北省鹤峰县城区滑坡地质灾害风险评价. *安全与环境工程*, 2021, 28(1): 144-155.]
- [26] Mei Hongru. Study on risk assessment and prevention measures of highway landslide in Yunnan [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. [梅鸿儒. 云南地区公路边坡地质灾害风险评估及防治措施研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.]
- [27] Chang T C, Chao R J. Application of back-propagation networks in debris flow prediction. *Engineering Geology*, 2006, 85(3/4): 270-280.
- [28] Zhao Yan, Meng Xingmin, Zheng Jiaoyu, et al. Application of geomorphological theory in study of debris flow and exploration of its applied theory. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1): 43-49. [赵岩, 孟兴民, 郑娇玉, 等. 地貌学在泥石流研究中的应用与理论初探. *灾害学*, 2017, 32(1): 43-49.]
- [29] Zhao fumeng. Early identification of geological hazards and evaluation of landslide susceptibility of China-Pakistan highway (China section) [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. [赵富萌. 中巴公路(中国段)地质灾害早期识别和滑坡易发性评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.]
- [30] Bi Jingjia. Estimation and simulation of flood inundation using remote sensing and GIS [D]. Qingdao: Institute of oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2016. [毕京佳. 基于遥感和GIS的洪水淹没范围估测与模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2016.]
- [31] Hu Hongchang. HHFS hydrological and hydrodynamic prediction platform. [https://47.104.228.80:8081/ModelBuilder/in-dex\\_en.html](https://47.104.228.80:8081/ModelBuilder/in-dex_en.html). [胡宏昌. HHFS水文水力预报平台. [https://47.104.228.80:8081/ModelBuilder/Index\\_en.html](https://47.104.228.80:8081/ModelBuilder/Index_en.html).]
- [32] Zhao Zhilong. Wetland information extraction and typical wetland change analysis in Qiangtang Plateau [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2014. [赵志龙. 羌塘高原湿地信息提取与典型湿地变化分析[D]. 西宁: 青海师范大学, 2014.]
- [33] Yao Xin, Deng Jianhui, Liu Xinghong, et al. Preliminary identification and development law analysis of active landslides in pan three parallel rivers area of Qinghai-Tibet Plateau by InSAR. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 16-37. [姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 等. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡InSAR初步识别与发育规律分析. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 16-37.]
- [34] Liu Yangyang. Study on safety risk assessment system of highway slope in mountainous areas supported by laser scanning technology [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019. [刘洋洋. 激光扫描技术支持下的山区公路边坡安全风险评价体系研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.]
- [35] Liu Chenguang. Protection technology of shallow river landslide based on vegetation slope protection. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2021, 27(5): 55-59. [刘辰光. 基于植被护坡的河道浅层滑坡防护技术. *水利科技与经济*, 2021, 27(5): 55-59.]
- [36] Zhou Wei, Li Hongbo, Zeng Hui. Variation pattern of plant root attributes under precipitation gradient in alpine grassland communities in Tibet. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(11): 1094-1102. [周玮, 李洪波, 曾辉. 西藏高寒草原群落植物根系属性在降水梯度下的变异格局. *植物生态学报*, 2018, 42(11): 1094-1102.]

## Distribution of hydropower development suitability in Tibet in the face of geological hazard susceptibility

ZHANG Xiguo<sup>1</sup>, ZHOU Xiongdong<sup>1</sup>, XU Mengzhen<sup>1</sup>, LIANG Xinyue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Tibet is recognized as the key repository and focal area for future hydropower development in China because of its high capacity for hydropower storage; however, frequent occurrence of geological hazards in this region have posed great challenges to us. Priority should be given to the effects of geological hazards on the suitability of areas in Tibet for hydropower development. Based on the maximum entropy model, the susceptibility of potential development areas to three typical geological hazards (debris flow, avalanche, and landslide) was calculated using data of landforms, hydrometeorology, and vegetation coverage of Tibet. Furthermore, hydropower development suitability was evaluated by considering distribution of potential hydropower storage alongside geological hazard susceptibility. The results show that the Qiangna-Bangxin section of the Great Bend of the Yarlung Tsangpo River has the highest suitability and would be a prime development target. The Mali-Linka and Zhonglinka-Chawalong sections in the middle reaches of the Nujiang River, the Tiantuo-Bitu section of the Wei qu River, the Chaya-Cuowa, Rumei-Yanjing, and Muxie-Gobo sections in the upper reaches of the Jinsha River, the Motuo-Lijia and Xiaru-Penji sections in the lower and upper reaches, respectively, of the Yarlung Tsangpo River, and the Pengqu River Basin in the Himalayas are all highly suitable for hydropower development. However, these areas also show high susceptibility to geological hazards, so they should be developed with caution. The Renbu-Qushui section in the middle reaches of the Yarlung Tsangpo River, the Zhongyu-Yigong section of the Yigong Tsangpo River, the southern section of the Chayu River, and the lower reaches of the Langqin Tsangpo River show moderate suitability and low hazard susceptibility, and thus present future development opportunities. Therefore, other areas are not suitable for hydropower development. This study presents an effective suitability evaluation method for hydropower development in Tibet, and its results provide a scientific basis for hydropower planning and site selection in this region.

**Keywords:** Tibet; hydropower; geological hazard susceptibility; maximum entropy model; hydropower development suitability