

基于确定性系数法的梯田型黄土滑坡 隐患影响因素分析

毛正君^{1,2,3}, 张瑾鸽¹, 仲佳鑫⁴, 王军⁵

(1.西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2.西安科技大学

煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 3.陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054;

4.宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 宁夏 银川 750002; 5.宁夏回族自治区矿产地质调查院, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 研究梯田型黄土滑坡隐患的影响因素, 旨在揭示梯田型黄土滑坡隐患的形成机理, 为防治梯田型黄土滑坡隐患提供科学依据。[方法] 基于 GEE 云计算平台, 以宁夏回族自治区彭阳县为研究区, 使用随机森林算法, 提取研究区梯田分布信息, 并基于叠置分析确定了研究区梯田型黄土滑坡隐患的高、极高易发性分区, 选取 8 个影响因素, 采用确定性系数法进行了分析。[结果] ①研究区梯田占全县总面积的 47.28%, 梯田影响范围内的正在变形区没有、潜在不稳定斜坡有 86 处。②梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区占研究区高、极高易发性分区总面积的 46.68%, 占研究区梯田总面积的 27.64%。③降雨量、地层岩性、沟谷密度、坡向对研究区内梯田型黄土滑坡隐患的空间分布具有较强的控制作用。[结论] 研究区梯田型黄土滑坡隐患的主要控制因素是降雨量与地层岩性, 尤其是当降水量 > 450 mm, 且存在第四系石质黄土夹古土壤地层的地区。

关键词: 梯田; 黄土滑坡隐患; 影响因素分析; 确定性系数法; GEE 云计算平台

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0183-10

中图分类号: P694

文献参数: 毛正君, 张瑾鸽, 仲佳鑫, 等. 基于确定性系数法的梯田型黄土滑坡隐患影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 183-192. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230327.003; Mao Zhengjun, Zhang Jingge, Zhong Jiaxin, et al. Sensitivity analysis on factors influencing loess terrace landslide potential using certainty factor method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 183-192.

Sensitivity Analysis on Factors Influencing Loess Terrace Landslide Potential Using Certainty Factor Method

Mao Zhengjun^{1,2,3}, Zhang Jingge¹, Zhong Jiaxin⁴, Wang Jun⁵

(1.College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2.Geological Research Institute for Coal Green Mining,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3.Shaanxi Provincial

Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

4.Ningxia Institute of Survey and Monitoring of Land and Resources, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

5.Ningxia Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The factors influencing landslide potential of loess terraces and the associated landslide formation mechanisms were studied in order to provide a scientific basis for the prevention and control of loess terrace landslides. [Methods] With data from the Google Earth Engine cloud computing platform for Pengyang County, Ningxia Hui Autonomous Region, we used the random forest algorithm to extract terrace distribution information in the study area. Based on the overlay analysis method, the high and extremely high susceptibility zones of potential loess terrace landslides in the study area were determined. Eight influencing factors were selected, and the certainty factor method was used for analysis. [Results] ① The terrace area in the study area accounted for 47.28% of the total area of the county. There were 86 potentially unstable slopes, and there were no deforming areas within the influence range of terraces. ② The high and extremely

收稿日期: 2022-05-27

修回日期: 2022-07-09

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目“宁南山区黄土滑坡隐患监测预警研究与示范”(2022BEG03059)

第一作者: 毛正君(1983—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士, 副教授, 主要从事地质环境保护与国土空间生态修复。Email: zhengjun_mao@163.com。

high susceptibility zones for potential landslides of loess terraces accounted for 46.68% of the total area of high and extremely high susceptibility zones in the study area (27.64% of the total area of terraces in the study area). ③ Rainfall, stratum lithology, gully density, and slope direction had strong controlling effects on the spatial distribution of potential landslides of loess terraces in the study area. [Conclusion] The main controlling factors for potential landslides of loess terraces in the study area were rainfall and stratum lithology, especially in the area where the annual rainfall was more than 450 mm and there were Quaternary stone loess with paleosol strata.

Keywords: terrace; loess potential landslide; analysis of influencing factors; certainty factor method; GEE cloud computing platform

随着工业化和城镇化水平的迅速提高,中国耕地数量和质量的不断下降,粮食安全和食品安全问题越来越突出^[1]。第三次全国国土调查的最新统计数据显示,全国耕地面积约为 1.28×10^8 hm²,旱地占中国耕地总面积的 50.33%^[2];全国坡度大于 6°的耕地有 2.90×10^7 hm²,占中国耕地总面积的 22.75%^[3]。黄河流域是中国重要的粮食生产基地和重要的能源基地,水资源短缺已经成为制约能源和粮食发展的关键要素^[4]。坡改梯工程可以增加耕地面积,能够提高雨水资源化程度和利用效率,增加土壤蓄水量,进而提高土壤抗旱保墒能力,并增加农产品产量^[5]。截至 2020 年底,黄河流域已修成梯田 6.08×10^6 hm²,占黄河流域耕地面积的 13%^[6]。从 20 世纪 80 年代“三西”建设开始,宁南黄土丘陵区进行了大面积的坡改梯工程^[7],截至 2015 年底梯田面积达到 2.65×10^5 hm²^[8]。

但是由于全球气候变化导致极端暴雨事件频发的背景下,使得梯田型黄土滑坡隐患时有发生^[9]。刘佳丽等^[9]采用 ABAQUS 建立黄土梯田边坡稳定性分析模型,计算田面宽度、田坎坡度、地面坡度对水平梯田稳定性的影响,为黄土梯田的优化设计提供参考。丁志强等^[10]基于 Google Earth 历史影像提取滑坡点数据,分析了哈尼梯田滑坡发生的时空变化特征。Camera 等^[11]研究了水文过程与梯田边坡稳定性的关系,提出了新的水文—稳定性耦合模型,能够预测识别梯田斜坡局部的易失稳区域。影响因素分析在水体分布、土地利用、地质灾害等方面应用广泛。李崇巍等^[12]分析了降雨、温度、植被叶面积指数、前一年地表水面积和水利水保措施与人类用水活动等对黄河流域地表水面积的影响量和相对影响率。朱从谋等^[13]基于相关分析和回归分析等方法,从自然条件、地理区位、交通条件和社会经济四方面,揭示杭州市土地利用功能权衡/协同关系的影响因素。靳鹏等^[14]对抚顺西露天矿滑坡、地裂缝的分布规律和影响因素进行了研究分析,发现滑坡与地裂缝存在同源性 and 互为因果性的链式关系,影响矿区地质灾害发生的主要因素为地质构造和不良工程地质环境控制、

采矿活动驱动、降雨及地下水因素的诱发。

确定性系数法 (certainty factor, CF) 最早由 Shortlife 等人^[15]提出,由 Heckerman^[16]加以改进,常被用于滑坡、地震等地质灾害分析。向灵芝等^[17]利用确定性系数法对地震滑坡的影响因子进行分析,发现了各影响因子最利于地震滑坡发育的数值区间。兰恒星等^[18]采用确定性系数法对云南小江流域进行了影响因素分析,确定了岩性、结构、坡度、高程、断裂等影响因子有利于滑坡的发育。LIN 等^[19]采用确定性系数法对湖南省慈利县武陵山地区的坡度、距断层距离、坡向、距水、岩土类型、高程、距道路距离、植被覆盖度等 8 个地质环境因子进行分析,确定了岩土类型、植被覆盖度和人类工程活动是造成滑坡灾害的关键因素。覃乙根等^[20]基于 GIS 平台,采用确定性系数法进行开阳县斜坡地质灾害孕灾因子分析,结果表明坡度、岩性、坡向、距河流距离、距断层距离、高程 6 个因子为开阳县地质灾害的主控因素。

本文基于 Google Earth Engine (GEE) 云计算平台,以宁夏回族自治区彭阳县为研究区,使用遥感影像监督识别技术随机森林 (random forest, RF) 算法,获取研究区的梯田分布信息,并基于叠置分析法,确定梯田型黄土滑坡隐患的高、极高易发性分区。选取 8 个滑坡隐患影响因素,结合确定性系数法,针对研究区梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区点进行影响因素分析研究,以期揭示梯田型黄土滑坡隐患的形成机理,为防治梯田型黄土滑坡隐患提供理论和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为宁夏回族自治区固原市彭阳县,位于宁夏南部,六盘山东侧,西与固原相邻,东、南、北分别与甘肃的镇原县、平凉市、环县接壤,位于 $106^{\circ}32' - 106^{\circ}58'E, 35^{\circ}41' - 36^{\circ}17'N$ 。研究区地形复杂,地貌破碎,沟壑纵横,梁峁起伏,按地形可分为黄土丘陵区、河谷残坡区、土石质山地区 3 种地貌特征。研究区属于温带半湿润、半干旱气候,具有四季分明,雨热

同季、干旱少雨等特点;多年平均气温 6.3 °C,最高气温在 7 月,多年平均 19.0 °C;最低气温在 1 月,多年平均 -8.2 °C。研究区大部分地区降雨量为 400~500 mm,自南向北减小,南北相差近 150 mm 左右。研究区内河流属泾河水系,主要河流有茹河、红河、安家川河,出露的地层有寒武系、奥陶系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系,且第四系地层广泛分布。

1.2 滑坡隐患编录

滑坡隐患编录是记录一个地区滑坡隐患的位置、

分类、体积、活动性和其他特征的清单^[21]。本文的滑坡隐患编录数据通过现场调查、遥感影像解译、资料收集获取。依据成都理工大学许强教授提出的滑坡隐患分类方法^[22],将其分为正在变形区、潜在不稳定斜坡和历史变形破坏区 3 类。正在变形区滑坡隐患无人机航拍和遥感影像如图 1 所示。潜在不稳定斜坡滑坡隐患无人机航拍和遥感影像如图 2 所示。历史变形破坏区滑坡隐患无人机航拍和遥感影像如图 3 所示。

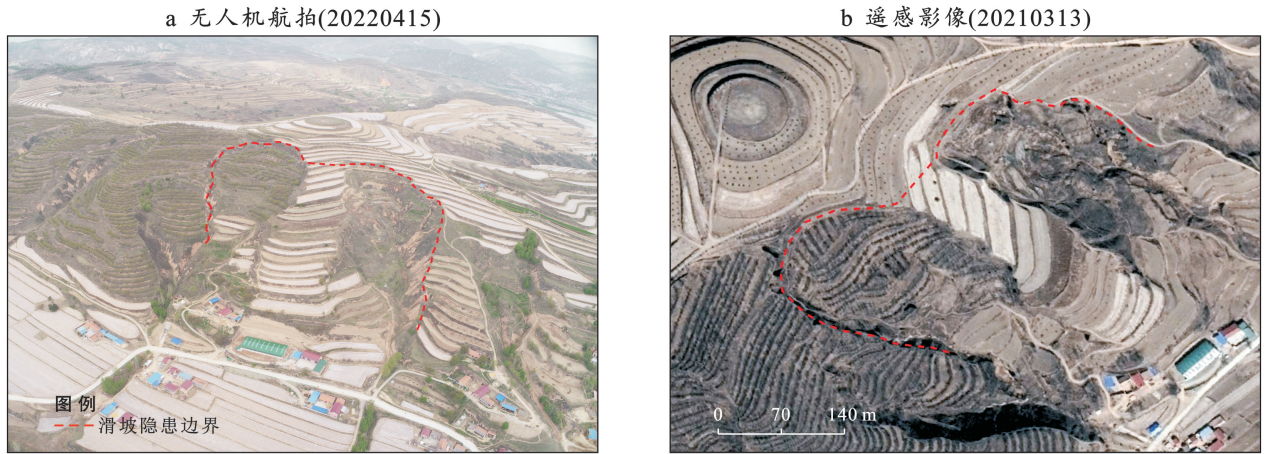
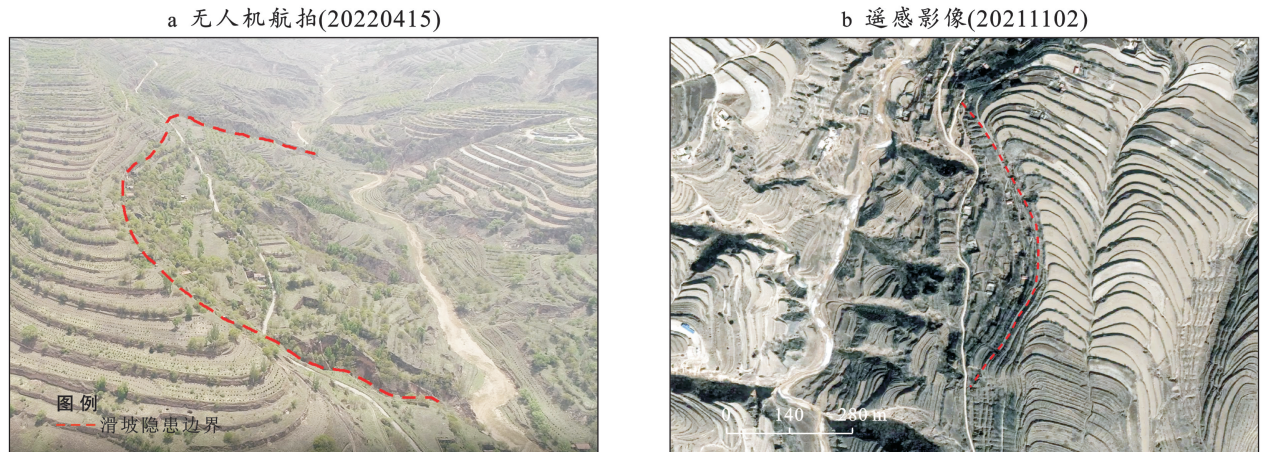


图 1 正在变形区滑坡隐患分布(古城镇挂马沟村)

Fig.1 Potential landslide distribution in the deformation area (Guamagou village, Gucheng Town)



注:遥感影像来源于 BIGEMAP 软件。下同。

图 2 潜在不稳定斜坡隐患分布(红河镇野王沟村)

Fig.2 Potential unstable slope hazards distribution (Yewangou village, Honghe Town)

1.3 梯田提取方法

1.3.1 影像数据 Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>) 是一个集遥感影像存储与分析于一体的综合应用平台,能够提供全球时间序列卫星图像、矢量数据、云计算和处理数据的软件与算法^[23]。本文采用 GEE 数据库中 2021 年研究区 T1 级别的 Landsat 8SR 数据集,该数据经过了几何校正、辐射校正和大气校正等预处理工作,空间分辨率 30 m,时间分辨率 16 d。

1.3.2 样本数据 本文将研究区土地利用类型仅分为梯田和其他两类,通过 Google Earth Pro 提供的高分辨率影像,采用目视解译法采集典型样本数据,共计 170 个,随机选择 70% 的样本数据作为训练数据,30% 的样本数据作为验证数据。

1.3.3 机器学习 随机森林是用随机方式建立包含多棵决策树的森林,其中每棵树都是一个基础学习器,“整片”森林对应着集成学习,是一种基于重抽样自举法的集成学习方法^[24]。随机森林(RF)算法具有

良好的实用性能和处理高维数据集的能力^[25]。本文基于 GEE 云计算平台,首先对 Landsat 8SR 数据进行去云,选择 Landsat 对应卫星影像的 6 个光谱波段,并计算水体指数(MNDWI)、归一化建筑指数

(NDBI)、归一化植被指数(NDVI)后,使用训练数据选取 RF 算法的关键参数,利用参数优化后的 RF 算法对研究区遥感影像进行梯田提取。相关步骤具体计算方法见参考文献[26]。

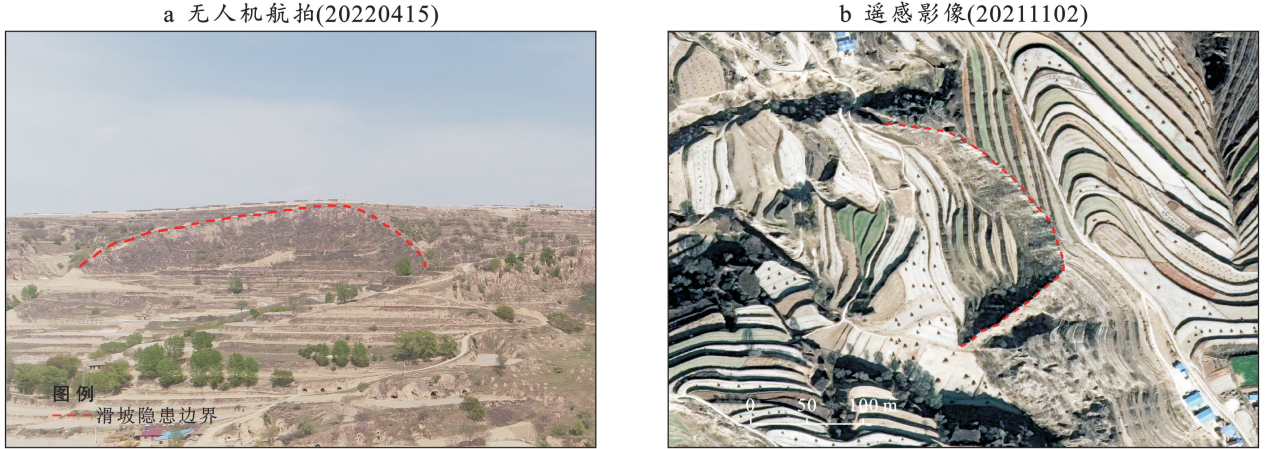


图 3 历史变形破坏区滑坡隐患分布(红河镇黑牛沟村)

Fig.3 Potential landslide distribution in historical deformation and damage area (Heiniu village, Honghe Town)

1.3.4 精度验证方法 采用验证数据,通过混淆矩阵方法,以总体精度、kappa 系数、生产者精度和用户精度等指标对研究区土地利用类型分类结果进行精度评价,确定研究区梯田提取的最终结果。精度验证指标计算公式分别为:

$$O = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{N} \quad (1)$$

式中: O 为总体精度; N 为用于精度评价的总样点数; n 为混淆矩阵中的总列数; X_{ii} 为混淆矩阵中第 i 行、第 i 列的样点数。

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}} \quad (2)$$

式中: K 为 kappa 系数; X_{i+} 、 X_{+i} 为混淆矩阵第 i 行和第 i 列的总样点数。

$$P = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \quad (3)$$

$$U = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \quad (4)$$

式中: P 为生产者精度; U 为用户精度。

1.4 叠置分析

叠置分析是地理信息系统中用来提取空间隐含信息的方法之一,将代表不同主题的各个数据层面进行逻辑交、逻辑差、逻辑并等运算叠置,以产生一幅源图层要素属性叠加组合分布特征的新图层,不仅生成了新的空间关系,而且还将输入的多个数据层的属性联系起来产生了新的属性关系^[27]。本文采用 ArcGIS 软件,利用逻辑交运算分别获得研究区黄土滑坡隐患

与梯田叠置分析图和梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区图。

1.5 影响因素分析

1.5.1 数据准备 通过对研究区地质环境特征、现场调研以及数据可用性分析,确定了 9 个梯田型黄土滑坡隐患影响因素,即地表粗糙度、地形湿度指数、沟谷密度、坡向、坡度、NDVI 值、降雨量、地层岩性、距道路距离。地表粗糙度、地形湿度指数、沟谷密度、坡向、坡度信息由 ALOS 生成的 DEM 数据提取获得。NDVI 数据由中国资源卫星应用中心 (<http://36.112.130.153:7777/DSSplatform/index.html>) 下载的 Landsat 8 影像生成。降雨量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/DataList1.aspx>)。地层岩性数据、距道路距离数据来源于 BIGEMAP 软件。

1.5.2 皮尔逊相关系数法 相关分析是研究和分析两个或两个以上现象相互联系的性质与程度的统计方法。本文采用 SPSS 26.0 软件中的皮尔逊相关系数确定梯田型黄土滑坡隐患影响因素的相关性。皮尔逊相关系数定义为独立且符合正态分布的两个变量的协方差和标准差的商,其定义公式为:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \quad (5)$$

式中: r 为相关系数; σ_x 为变量 X 的标准差; σ_y 为变量 Y 的标准差; σ_{xy} 为变量 X 和 Y 的协方差。 r 值介于 $-1 \sim 1$, 即 $|r| \leq 1$ 。 $|r|$ 越接近于 1, 两变量的相关程度越高。当 $|r| \geq 0.8$ 时, 变量高度相关, 当 $0.5 \leq |r| < 0.8$ 时, 变量为中度相关, 当 $0.3 \leq |r| < 0.5$ 时,

变量为低相关,当 $|r| < 0.3$ 时,变量的相关性极弱,基本不相关^[28]。

1.5.3 确定性系数法 采用确定性系数法进行研究区梯田型黄土滑坡隐患影响因素分析。确定性系数法作为一个概率函数,表示为^[15]:

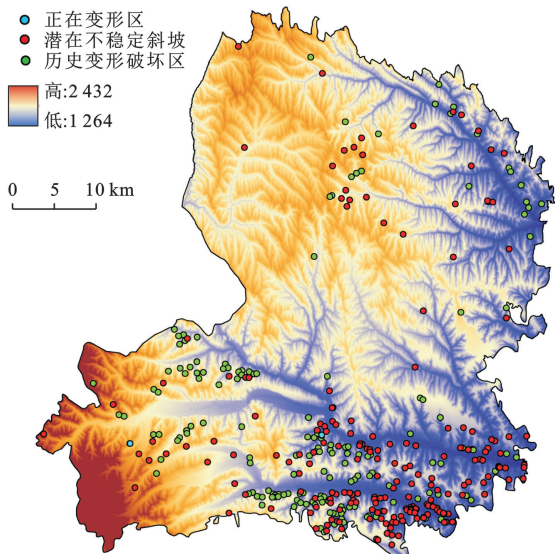
$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & (PP_a \geq PP_s) \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & (PP_a < PP_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中:CF 为确定性系数; PP_a 为分级影响因素 a 中滑坡隐患发生的条件概率,即分级影响因素 a 中的滑坡隐患个数与 a 的面积之比; PP_s 为在整个研究区中滑坡隐患发生的先验概率,即研究区滑坡隐患总数与研究区总面积比值。CF 的值域为 $[-1, 1]$ 。CF 为正值代表计算单元中滑坡隐患事件发生的确定性增长,越接近于 1 其确定性越高,越容易发生滑坡;CF 为负值代表计算单元发生滑坡隐患的确定性降低,越接近 -1 其确定性越低,表明其越不易于发生滑坡;当 CF 接近于 0 时,代表条件概率与先验概率相同,不确定是否会发生滑坡隐患。

2 结果与分析

2.1 梯田型黄土滑坡隐患发育程度分析

2.1.1 黄土滑坡隐患编录 研究区黄土滑坡隐患编录图如图 4 所示。研究区共确定了 371 个黄土滑坡隐患点,在研究区东南部的红河和茹河流域密集分布,在研究区西南部的红河和茹河流域以及东北部的安家川河流域零散分布。



注:图中县界根据天地图宁夏地理信息公共服务平台(<https://ningxia.tianditu.gov.cn/>)中宁夏彭阳县标准地图进行了校对。下同。

图 4 研究区黄土滑坡隐患编录

Fig.4 Loess potential landslide cataloging in the study area

2.1.2 梯田分布提取 基于 GEE 云计算平台,采用 RF 算法对研究区梯田进行了提取。研究区梯田分布如图 5 所示。利用混淆矩阵法对梯田提取结果进行精度评价,梯田提取的总体精度为 97.22%,kappa 系数为 0.943 4,生产者精度为 0.937 5,用户精度为 0.952 4,表明研究区梯田提取结果较好。梯田在研究区全域均有分布,占总面积的 47.28%,其中研究区西南部土石质山区和县城所在地零星分布,研究区东南部和东北部相对较少,其余地区较密集。

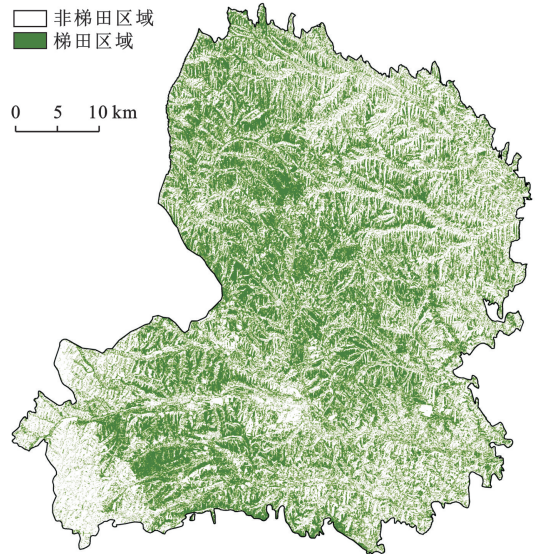


图 5 研究区梯田分布

Fig.5 Distribution of terraced fields in the study area

2.1.3 梯田型黄土滑坡隐患发育程度分析 由于研究区梯田建设主要从 20 世纪 80 年代开始,而研究区黄土滑坡隐患历史变形破坏区的发生时间相对较早,大多数具体发生时间难以确定。因此,为了探究研究区梯田型黄土滑坡隐患发育程度,本文仅关注研究区 201 处潜在不稳定斜坡^[29]和 2 处正在变形区两类黄土滑坡隐患。将研究区潜在不稳定斜坡和正在变形区两类黄土滑坡隐患与梯田分布进行叠置分析,得到黄土滑坡隐患与梯田叠置分析图(图 6)。根据统计分析,梯田影响范围内的正在变形区没有、潜在不稳定斜坡有 86 处,主要分布在研究区东南部,占黄土滑坡隐患点总数的 42.36%。

根据研究区滑坡灾害易发性分区图^[30],划分为极低、低、中、高、极高易发区(图 7)。将研究区滑坡灾害高、极高易发区与梯田分布图进行叠置分析,得到梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区图(图 8)。根据统计分析,梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区占研究区高、极高易发性分区总面积的 46.68%,占研究区梯田总面积的 27.64%,占研究区

2.3 梯田型黄土滑坡隐患影响因素分析

2.3.1 沟谷密度 黄土高原的沟谷侵蚀是塑造地表形态的重要侵蚀方式,沟谷密度作为一种反映区域受沟蚀程度的重要指标,对于揭示该地区的地面破碎程度与地貌发育进程,具有重要的意义^[31]。沟谷密度也称沟壑密度,指单位面积内沟谷的总长度,是反映自然地形侵蚀强的重要指标。沟谷密度越大,表明地面被切割得越破碎,侵蚀越强烈,平均坡度增大,坡体临空面增多,表层土体稳定性降低,导致滑坡灾害发育。本文采用 ArcGIS 软件,基于研究区数字高程模型(DEM),提取研究区的沟谷网络,并利用字段计算器计算研究区的沟谷密度值,采用自然断点法将其分为 5 个级别,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 2)。结果表明,在沟谷密度 > 2.31 的范围内有利于研究区梯田型黄土滑坡隐患发育。

表 2 研究区沟谷密度分级及 CF 值

沟谷密度	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<1.03	14	0.027 0	-0.205 9
1.03~1.43	21	0.026 5	-0.220 4
1.43~1.83	31	0.045 1	0.247 6
1.83~2.31	13	0.031 3	-0.077 1
>2.31	7	0.058 1	0.415 6

注:PP_a 为分级影响因素;CF 为确定性系数。下同。

2.3.2 地形湿度指数 地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)是 1979 年由 Beven 和 Kirkby^[32]提出的用于反映土壤饱和和缺水空间分布的参数,是一种基于 DEM 的对水流路径长度、产流面积以及土壤径流产生能力的重要量化指标。地形湿度指数的大小由区域的坡面汇流面积和水力坡降两要素决定,地形湿度指数愈大,表示坡面汇流面积越大、水力坡降越低,则该区域的饱和带发展潜力越大,土壤就越容易达到饱和而产生地表径流。采用自然断点法将研究区地形湿度指数分为 5 个级别,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 3)。结果表明,最容易发生滑坡的地形湿度指数范围为 6.59~9.65,表明地形湿度越大和越小都不利于梯田型黄土滑坡隐患的发育。

表 3 研究区地形湿度指数分级及 CF 值

Table 3 Topographic wetness index grading and CF values in the study area

地形湿度指数	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<4.85	30	0.028 7	-0.154 3
4.85~6.59	36	0.037 3	0.090 0
6.59~9.65	17	0.044 8	0.242 0
9.65~14.67	2	0.021 1	-0.379 1
>14.67	1	0.021 8	-0.359 1

2.3.3 地表粗糙度 地表粗糙度是对地面起伏度和破碎程度的度量,从一定程度上反映了地表单元地势起伏的复杂程度,对地质灾害的发生具有重要意义。地表粗糙度的改变影响坡面径流的水动力学特性的变化规律,从而影响土壤侵蚀的进程和结果。对研究区内地表粗糙度以 0.1 为间隔进行分级,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 4)。结果表明,研究区随着地表粗糙度的增加,反而抑制了梯田型黄土滑坡隐患的发育。

表 4 研究区地表粗糙度分级及 CF 值

Table 4 Surface roughness grading and CF value in the study area

地表粗糙度	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<1.1	83	0.036 7	0.073 9
1.1~1.2	2	0.008 5	-0.749 1
>1.2	1	0.030 8	-0.091 4

2.3.4 地层岩性 地层岩性是决定斜坡岩土体强度、应力分布、变形破坏特征的基本条件,是孕育滑坡发生的重要内在因素。地层岩性决定了滑坡发生的类型与规模特征。研究区的地层岩性划分以地层年代和岩性组合综合考虑进行划分,共划分为 12 个类型,分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 5)。结果表明,第四系石质黄土夹古土壤层(类型 3)最有利于梯田型黄土滑坡隐患发生。

表 5 研究区地层岩性分级及 CF 值

Table 5 Stratum lithologic grading and CF value in the study area

地层岩性	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
类型 1	8	0.038 4	0.116 0
类型 2	69	0.034 9	0.027 3
类型 3	1	0.120 0	0.717 2
类型 4	2	0.034 7	0.022 6
类型 8	6	0.023 9	-0.296 2

注:地层岩性 12 个类型分别为:类型 1 第四系冲积砾石、砂岩、黏质沙土、砂,类型 2 第四系粉砂质黄土,类型 3 第四系石质黄土夹古土壤层,类型 4 新近系泥岩夹砾岩扁豆体,类型 5 新近系黏土,类型 6 古近系含砾砂岩、砂岩,类型 7 古近系粉砂岩、泥岩,夹砂岩,类型 8 白垩系砾岩、砂岩、含砾砂岩、泥岩夹粉砂岩,类型 9 侏罗系砂岩、页岩夹煤层、黏土,类型 10 奥陶系灰岩,类型 11 寒武系灰岩、页岩,类型 12 震旦系含燧石条带硅质灰岩、白云岩,其中类型 5,6,7,9,10,11,12 岩性中没有梯田型滑坡隐患点。

2.3.5 降雨量 降雨是滑坡灾害的诱发因素之一,常作为边坡稳定性评价和滑坡影响因素分析的重要指标。水的存在使边坡岩土体物理力学性质逆化,降低了岩土体的抗剪强度,并且地表水的冲刷作用和地下

水的静动力学效应使边坡原有力学平衡被破坏,很大程度上改变了斜坡的稳定性。将研究区年平均降雨量分为 3 级,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 6)。结果表明,随着年平均降雨量的增加,梯田型黄土滑坡隐患的发生数量显著增加,CF 值逐渐增大。

表 6 研究区降雨量分级及 CF 值

Table 6 Rain fall grading and CF value in the study area

降雨量/mm	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<400	10	0.011 5	-0.661 2
400~450	26	0.019 7	-0.419 5
>450	50	0.140 1	0.757 8

2.3.6 植被归一化指数(NDVI) NDVI 作为一种表征植被特征的指数,能在一定程度上代表诱发地质灾害的外部因素,对滑坡的影响体现在植被根系对边坡的加固作用,从而减缓地表水的侵蚀和入渗。NDVI 小于 0 时表示地面覆盖物为对可见光高反射的地物;当 NDVI 为 0 时表示地面为岩石或裸土;当 NDVI 大于 0 时表示有植被覆盖。本文基于 Landsat 8 遥感影像,采用 ArcGIS 软件,根据近红外波段的反射值与红光波段的反射值之差比上两者之和,计算研究区的 NDVI 数据。采用自然断点法将研究区 NDVI 分为 3 个级别,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 7)。结果表明,研究区当 NDVI>0.05 范围时 CF 值接近 -1,不利于梯田型黄土滑坡隐患的形成。

表 7 研究区 NDVI 分级及 CF 值

Table 7 NDVI grading and CF value in the study area

NDVI	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<-0.08	37	0.035 9	0.054 8
-0.08~-0.05	44	0.037 2	0.086 4
>-0.05	5	0.015 5	-0.541 9

2.3.7 坡向 坡向对地质灾害发生的控制作用主要表现在山坡的小气候以及水热比的规律性变化。在不同倾向的斜坡面上太阳辐射强度存在差异,会对植被覆盖、蒸发量和土壤湿度等产生一定影响,从而使斜坡岩土体物理力学特征和地下孔隙水压力的分布发生改变,最终对斜坡的稳定性造成影响。本文通过 ArcGIS 软件将研究区的坡向数据分为 8 级,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 8)。结果表明,研究区利于梯田型黄土滑坡隐患发生的坡向为北、东北、南、西南、西向,其中坡向为北向最发育。

表 8 研究区坡向分级及 CF 值

Table 8 Aspect grading and CF value in the study area

坡向/(°)	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
335.5°~22.5°	7	0.051 2	0.337 4
22.5°~67.5°	15	0.039 8	0.147 3
67.5°~112.5°	11	0.023 2	-0.316 9
112.5°~157.5°	5	0.017 8	-0.478 9
157.5°~202.5°	11	0.041 6	0.183 2
202.5°~247.5°	15	0.048 6	0.301 0
247.5°~292.5°	16	0.040 2	0.155 8
292.5°~337.5°	6	0.021 3	-0.373 9

2.3.8 距道路距离 研究区地形以黄土梁峁为主,在道路建设中,不可避免地会出现边坡工程,不仅改变了斜坡的地形,而且改变了斜坡浅层的应力分布,是主要诱发滑坡的人类工程活动。本文将研究区路网按 200 m 间距分为 5 个分级影响因素,并分别计算各分级影响因素的 CF 值(表 9)。结果表明,距道路距离>800 m 时,滑坡隐患数目最大,其 CF 值仅为 0.012 2。在 0~800 m 时随着距道路距离的增大 CF 值逐渐减小,说明距道路距离越小,越有利于研究区梯田型黄土滑坡隐患的发育。

表 9 研究区距道路距离分级及 CF 值

Table 9 Distance from road grading and CF value in the study area

距道路距离/m	滑坡隐患数量/个	PP _a	CF
<200	15	0.045 3	0.251 4
200~400	10	0.037 5	0.095 2
400~600	3	0.012 6	-0.627 9
600~800	7	0.032 3	-0.048 3
>800	51	0.034 4	0.012 2

3 讨论

滑坡机理研究是分析斜坡在其固有地质特征与诱发因素共同作用下,从稳定状态到失稳滑动,再达到新的稳定状态或永久稳定(死亡)整个过程动态变化的物理力学本质和规律,是滑坡预测预报和有效防治的理论基础^[33]。研究人员已经开展了诸多与滑坡机理有关的研究,如滑坡形成的条件和作用因素^[34-36]、滑坡的受力状态^[37]、滑带土的强度变化规律^[38]、滑坡的破坏模式以及发育阶段^[39]等。滑坡灾害最容易发生在地质环境脆弱的区域和稳定性相对较差的斜坡部位,这些区域和部位就是需要重点关注的潜在滑坡灾害隐患区。在明确滑坡灾害隐患的主要类型、特点、主要出露部位后,就可以采取针对性的措施进行滑坡灾害隐患的早期识别和提前发现,解决“隐患点在哪里”的问题。本文针对研究区梯田型黄

土滑坡隐患的影响因素进行分析,能够为揭示研究区及黄河流域梯田型黄土滑坡隐患的形成机理提供依据。

在对研究区梯田型黄土滑坡隐患的 8 个影响因素进行分析的基础上,发现降雨量、地层岩性、沟谷密度、坡向对研究区内梯田型黄土滑坡隐患的空间分布具有较强的控制作用。在 >450 mm 的降雨量范围内研究区梯田型黄土滑坡隐患的发生确定性最高,CF 值为 0.757 8,降雨能够增大滑坡体的自重,导致下滑力增大,同时使土体基质吸力增大,抗剪强度降低,有利于研究区梯田型黄土滑坡隐患的发育。研究区地层岩性为第四系石质黄土夹古土壤层时,CF 值为 0.717 2,古土壤层作为软弱岩层面,在降雨等外因作用下,容易诱发研究区梯田型黄土滑坡隐患失稳破坏。沟谷密度在 >2.31 范围时,CF 值为 0.415 6,沟谷密度越大表明地表破碎越强烈,形成的黄土边坡临空面较多,在降雨等外界因素作用下,研究区梯田型黄土滑坡隐患较为发育。坡向为北时,CF 值为 0.337 4,这是因为研究区梯田型黄土滑坡隐患主要分布在县域内三条主要河流茹河、红河、安家川河的沿岸,又由于阴坡比阳坡潮湿,在河流、日照等外界条件作用下,使得北向为研究区梯田型黄土滑坡隐患的易发坡向。但研究区梯田型黄土滑坡隐患的形成是多因素共同作用的结果,各因素也存在着各种复杂的相互作用,本文仅对研究区梯田型黄土滑坡隐患影响较大的 8 个影响因素进行了独立分析,各影响因素间的相互作用还需要进一步研究。

敏感性指数(E)可从整体上反映某一类影响因素对滑坡灾害的影响程度,本文通过将各影响因素确定性系数的最大值与最小值作差,对影响因素的敏感性大小进行进一步的研究,计算结果详见表 10。结果表明,8 个影响因素对研究区梯田型黄土滑坡隐患的影响程度依次为降雨量、地层岩性、距道路距离、地表粗糙度、坡向、沟谷密度、NDVI 值、地形湿度指数。其中,降雨量与地层岩性的敏感性指数大于 1,表明这 2 个因素为研究区梯田型黄土滑坡隐患的主要控制因素。

目前对于坡改梯工程,研究人员重点关注其正效应,往往忽视了梯田型黄土滑坡隐患。由于全球气候变化导致极端暴雨事件频发^[9,40],坡改梯工程的实施,使得坡面降雨入渗条件发生了较大的变化,降雨入渗量增加,土体基质吸力降低,下滑力增大,降低了边坡的稳定性,尤其是在古(老)滑坡体上进行坡改梯,使古(老)滑坡复活的可能性增大。因此,重视梯田型黄土滑坡隐患风险识别与评估管理,将为进一步

推广坡改梯工程及保护已建梯田,并为增加农民收入、科技服务“三农”、推动乡村振兴提供理论和科学依据。

表 10 研究区梯田型黄土滑坡隐患影响因素影响程度
Table 10 The influence degree of the influencing factors of terrace loess potential landslide in the study area

影响因素	$CF_{i,max}$	$CF_{i,min}$	E_i
降雨量	0.757 8	-0.661 2	1.419 0
地层岩性	0.717 2	-0.296 2	1.013 4
距道路距离	0.251 4	-0.627 9	0.879 3
地表粗糙度	0.073 9	-0.749 1	0.823 0
坡向	0.337 4	-0.478 9	0.816 3
沟谷密度	0.415 6	-0.220 4	0.636 0
NDVI 值	0.086 4	-0.541 9	0.628 3
地形湿度指数	0.242 0	-0.379 1	0.621 1

4 结论

(1) 基于 GEE 云计算平台和 RF 算法对研究区梯田进行了提取,梯田提取的总体精度为 97.22%,kappa 系数为 0.943 4。研究区梯田面积占全县总面积的 47.28%,其中西南部土石质山区和县城所在地零星分布,东南部和东北部相对较少,其余地区较密集。研究区潜在不稳定斜坡和正在变形区两类黄土滑坡隐患共 203 处,梯田影响范围内的正在变形区没有、潜在不稳定斜坡有 86 处,主要分布在研究区东南部,占黄土滑坡隐患点总数的 42.36%。

(2) 梯田型黄土滑坡隐患高、极高易发性分区占研究区高、极高易发性分区总面积的 46.68%,占研究区梯田总面积的 27.64%,占研究区总面积的 13.07%。

(3) 降雨量、地层岩性、沟谷密度、坡向对研究区内梯田型黄土滑坡隐患的空间分布具有较强的控制作用。在 >450 mm 的降雨量范围内研究区梯田型黄土滑坡隐患发生的确定性最高,CF 值为 0.757 8;第四系石质黄土夹古土壤层的地层岩性、沟谷密度在 >2.31 范围内、坡向为北时研究区梯田型黄土滑坡隐患发生的确定性较高,CF 值分别为 0.717 2,0.415 6,0.337 4。

(4) 从敏感性指数角度看,降雨量与地层岩性的敏感性指数大于 1,表明这两个因素为研究区梯田型黄土滑坡隐患的主要控制因素。

[参 考 文 献]

- [1] 王军,李萍,詹韵秋,等.中国耕地质量保护与提升问题研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(4):87-93.
- [2] 自然资源部.第三次全国国土调查主要数据成果发布[EB/OL].(2021-08-26)[2022-05-14]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678337.html.

- [3] 新华社.第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL]. (2021-8-26)[2022-05-14]. http://www.news.cn/2021-08/26/c_1127797077.htm.
- [4] 彭俊杰.黄河流域“水—能源—粮食”纽带系统的耦合协调及时空分异[J].区域经济评论,2022(2):51-59.
- [5] 蔡进军,张源润,火勇,等.宁南山区梯田土壤水分及养分特征时空变异性研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):83-87.
- [6] 水利部.《黄河流域水土保持公报(2020年)》发布[EB/OL]. (2020-01-26)[2022-05-14]. http://www.mwr.gov.cn/xw/sjzs/202201/t20220126_1560631.html.
- [7] 王爱云.1978—1985年的农村扶贫开发[J].当代中国史研究,2017,24(3):36-50,125.
- [8] 岳自慧,睦克仁,刘平,等.宁南山区坡改梯作物产量变化规律研究[J].中国水土保持,2017(9):56-58,67.
- [9] 刘佳丽,田佳,郑田恬,等.基于边坡稳定的黄土梯田优化设计[J].中国水土保持科学,2020,18(4):21-28.
- [10] 丁智强,高璇,角媛梅,等.基于空间密度函数的哈尼梯田世界遗产地滑坡时空格局变化[J].热带地理,2020,40(3):478-486.
- [11] Camera C, Apuani T, Masetti M. Modeling the stability of terraced slopes: An approach from Valtellina (Northern Italy) [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(1):855-868.
- [12] 李崇巍,王志慧,汤秋鸿,等.1986—2019年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素[J].地理学报,2022,77(5):1153-1168.
- [13] 朱从谋,苑韶峰.杭州市土地利用功能时空权衡特征及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(6):264-273.
- [14] 靳鹏,申力,韩晓极,等.辽宁抚顺西露天矿地质灾害时空分布特征及影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):68-76.
- [15] Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine [J]. Mathematical Biosciences, 1975,23(3/4):351-379.
- [16] Heckerman D. Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors [M]//North-Holland: Machine Intelligence and Pattern Recognition, 1986.
- [17] 向灵芝,崔鹏,张建强,等.汶川县地震诱发崩滑灾害影响因素的敏感性分析[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):105-112.
- [18] 兰恒星,伍法权,周成虎,等.基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.
- [19] Lin Wei, Yin Kunlong, Wang Ningtao, et al. Landslide hazard assessment of rainfall-induced landslide based on the CF-SINMAP model: A case study from Wuling Mountain in Hunan Province, China [J]. Natural Hazards, 2021,106(1):679-700.
- [20] 覃乙根,杨根兰,谢金,等.贵州省开阳县斜坡地质灾害孕灾因子敏感性分析[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):190-198.
- [21] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning [J]. Engineering Geology, 2008,102(3/4):99-111.
- [22] 许强,陆会燕,李为乐,等.滑坡隐患类型与对应识别方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(3):377-387.
- [23] Kumar L, Mutanga O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential [J]. Remote Sensing, 2018,10(10):1509.
- [24] 薛薇作.数据建模与分析面向新工科高等院校大数据专业系列教材 Python 机器学习[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [25] Scornet E. Random forests and kernel methods [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016,62(3):1485-1500.
- [26] 李万源,田佳,马琴,等.基于Google Earth Engine与机器学习的黄土梯田动态监测[J].浙江农林大学学报,2021,38(4):730-736.
- [27] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析试验教程[M].2版.北京:科学出版社,2012.
- [28] 尚敏,廖芬,马锐,等.白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量分析研究[J].工程地质学报,2021,29(3):742-750.
- [29] 张黎,倪万魁,张钦,等.宁夏彭阳县地质灾害[M].宁夏银川:宁夏人民出版社,2010.
- [30] Mao Zhengjun, Shi Shuojie, Li Huan, et al. Landslide susceptibility assessment using triangular fuzzy number-analytic hierarchy processing (TFN-AHP), contributing weight(CW)and random forest weighted frequency ratio (RF weighted FR) at the Pengyang county, Northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2022,81:86.
- [31] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622-628.
- [32] 张鹏,赵牡丹,郝家琪,等.基于梯田信息的地形湿度指数表达研究[J].水土保持通报,2018,38(1):187-191.
- [33] 王恭先.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [34] 邱俊,任光明,王云南.层状反倾—顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征[J].岩土力学,2016,37(S2):513-524,532.
- [35] 毛正君,耿咪咪,毕银丽,等.紫花苜蓿—黄土复合体抗剪强度时间效应研究[J/OL].煤炭科学技术,2023-03-23,<https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2230>.

细血管”分支河道的保护和水系沟通;在城市强排区,增加生态用地的规模、整合碎片化的生态用地、控制和优化植被养护施肥,以强化径流污染削减、进一步提升城市河流水质。

[参 考 文 献]

- [1] 上海市水务局,上海市规划和自然资源局.上海市河道规划设计导则[M].上海:上海市水务局,上海市规划和自然资源局,2018.
- [2] Clément F, Ruiz J, Rodríguez M A, et al. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 726:27-639.
- [3] Janardan M, Chang H. Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564:26-40.
- [4] 李昆,王玲,孙伟,等.城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析[J].*环境科学学报*, 2020, 40(1): 343-352.
- [5] 梁琦珍,陈梅花,张甜,等.河岸缓冲带景观格局变化及对水体恢复的影响:以钱塘江主干河岸缓冲带为例[J].*城市地理*, 2016(6):191-193.
- [6] Xie Yujing, Yu Xijun, Ng Nam-Cho, et al. Exploring the dynamic correlation of landscape composition and habitat fragmentation with surface water quality in the Shenzhen River and deep bay cross-border watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 902:31-246.
- [7] 郭二辉,常海荣,陈家林,等.城市河流河岸带的类型、干扰特征及恢复对策:以北京市温榆河为例[J].*福建林业科技*, 2016, 43(1):175-181.
- [8] 张静,郭羽羽,李思悦,等.黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系[J].*湖泊科学*, 2021, 33(3):737-748.
- [9] Shen Zhenyao, Hou Xiaoshu, Li Wen, et al. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 123: 96-107.
- [10] Christina W, Stefan P, Gunnar L. Stream water quality affected by interacting hydrological and biogeochemical processes in a riparian wetland [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563:260-272.
- [11] Stutter M, Baggaley N, HUallacháin D, et al. The utility of spatial data to delineate river riparian functions and management zones: A review [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 757:143982.
- [12] Danielle S. Using plan and ordinance quality to evaluate the implementation of riparian buffer policies. *Landscape and Urban Planning* [J], 2019, 183:1-11.
- [13] 上海市水务局,上海市规划和自然资源局.上海市城镇雨水排水规划(2020—2035)[M].上海:上海市水务局,上海市规划和自然资源局,2020.
- [14] 张媛.城镇化背景下土地利用变化对河流水环境的影响[D].江苏 南京:南京大学,2015.
- [15] 李琳琳.太子河流域土地利用对地表地下水水质的影响研究[D].山东 济南:济南大学,2015.
- [16] 赵军,杨凯,邰俊,等.区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展[J].*生态学报*, 2011, 31(11):3180-3189.
- [17] Zhao Jun, Lin Liqing, Yang Kai, et al. Influences of land use on water quality in a reticular river network area: A case study in Shanghai, China [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2015, 137:20-29.
- [18] 刘辰,金妍,杨凯,等.基于河网水系的江南水乡风貌和文化保护途径:以上海朱家角镇为例[J].*世界地理研究*, 2011, 20(2):169-176.
- [19] 金妍,车越,杨凯.基于最小累积阻力模型的江南水乡河网分区保护研究[J].*长江流域资源与环境*, 2013, 22(1):8-14.
- [20] 白义琴.上海浦东新区快速城市化进程中河网变迁特征及水系保护研究[D].上海:华东师范大学, 2010.
- [36] Zhang Zhongqiong, Li Miao, Wang Jia, et al. A calculation model for the spatial distribution and reserves of ground ice: A case study of the Northeast China permafrost area [J]. *Engineering Geology*, 2023, 315:107022.
- [37] 张龙飞,吴益平,苗发盛,等.推移式缓倾浅层滑坡渐进破坏力学模型与稳定性分析[J].*岩土力学*, 2019, 40(12):4767-4776.
- [38] 刘虎虎,缪海波,陈志伟,等.三峡库区侏罗系顺层滑坡滑带土的剪切蠕变特性[J].*岩土工程学报*, 2019, 41(8):1573-1580.
- [39] 张令非,陈忠辉,唐岳松.含弱层边坡分区滑动破坏模式及演化规律研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6):1145-1154.
- [40] 程圣东,杭朋磊,李鹏,等.陕南土石山区坡改梯对坡面稳定性的影响[J].*水土保持研究*, 2018, 25(5): 157-161.

(上接第 192 页)