

1985—2020 年天水市黄土区滑坡灾损土地利用时空变化特征

贾 静^{1,2}, 宿 星², 张 军¹, 张满银², 李 霞², 魏万鸿²

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,兰州 730070;2.甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,兰州 730000)

摘要:为探索甘肃省天水市滑坡土地利用特征及时空变化规律,选取秦州区和麦积区作为典型黄土滑坡区的代表,基于 12.5 m 分辨率的 ALOS DEM 数据和 1985—2020 年全球 30 m 的精细地表覆盖动态监测产品,利用 GIS 空间分析、土地利用净变化量指数、土地利用转移矩阵和土地利用贡献率,分析滑坡体的特征参数、土地利用/覆被类型、土地利用转移特征及驱动因素。结果表明:(1)研究区共识别出 469 个滑坡样本,平均高程集中于 1 200~1 400 m,平均坡度 10°~15°,平均坡向为西向坡,前后缘相对高差 100~150 m,滑坡面积 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑坡长度 200~400 m。(2)1985—2020 年滑坡区旱地最多,草原次之;期间土地利用类型呈现动态变化特征,分为 1985—2000 年持续变化阶段和 2000—2020 年微弱调整阶段;其中 1995—2000 年变化最剧烈,主要表现为旱地向草原和林地转化。(3)35 年间旱地面积转化最多,累计 8.74 km²,贡献给草原 6.58 km²、封闭落叶阔叶林 1.94 km²、不透水表面 0.20 km²,其余的土地利用类型占比小,转化微弱;旱地、草原、封闭落叶阔叶林和不透水表面的土地利用净变化量最大。(4)单个滑坡体的利用方式逐年多样化,草原和封闭落叶阔叶林的增加提升区域的植被覆盖度,降低再次发生滑坡的可能性。天水市区滑坡土地利用类型和时空变化规律为区域灾损土地的开发再利用及生态修复提供科学依据。

关键词: 滑坡; 灾损土地; 土地利用/覆被变化; 转移矩阵; 天水市

中图分类号: P642.22; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0195-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.025

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Landslide Disaster Damage Land Use in Loess Area of Tianshui City from 1985 to 2020

JIA Jing^{1,2}, SU Xing², ZHANG Jun¹, ZHANG Manyin², LI Xia², WEI Wanhong²

(1.College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2.Institute of Geological Natural Disaster Prevention and Control, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: To explore the land use characteristics and spatial and temporal changes of landslides in Tianshui City, Gansu Province, Qinzhou District and Maiji District were selected as the representatives of typical loess landslide areas, based on 12.5 m resolution ALOS DEM data and the global 30 m fine ground cover dynamic monitoring products from 1985 to 2020, using GIS spatial analysis, land use net change volume index, land use transfer matrix and land use contribution ratio to analyze the characteristic parameters, land use/cover types, land use transfer characteristics and driving factors of landslides. The results showed that: (1) A total of 469 landslide samples were identified in the study area, with the average elevation concentrated in 1 200~1 400 m and the average slope concentrated in 10°~15°, the average aspect was westward slope, the relative height difference between the front and back edges concentrated in 100~150 m, the landslide area concentrated in $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^2$, and the sliding length concentrated in 200~400 m. (2) From 1985 to 2020, the landslides were the most frequent in rainfed croplands, followed by grasslands; the land use types during the period showed dynamic change characteristics, divided into a continuous phase change phase from 1985 to 2000 and a weak adjustment phase from 2000 to 2020; among them, the most drastic changes were observed from 1995 to 2000, mainly in the transformation of rainfed croplands to grasslands and forest lands.

收稿日期: 2022-12-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(42067066); 甘肃省科学院应用研发项目(2021JK-08); 甘肃省 2022 年度重点人才项目(2022RCXM094); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA736, 21JR7RA737); 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0902)

第一作者: 贾静(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事灾损土地利用与生态修复研究。E-mail: jingjia0110@163.com

通信作者: 张军(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

(3) The transformation of rainfed cropland area was the most in the past 35 years, with a cumulative total of 8.74 km², contributing 6.58 km² to grassland, 1.94 km² to closed deciduous broadleaved forest and 0.20 km² to impervious surfaces, while the remaining land use types account for a small proportion and weak transformation; the net land use changes of rainfed cropland, grassland, closed deciduous broadleaved forest and impervious surfaces were the largest. (4) The utilization of individual landslides was diversified year by year, and the increase of grasslands and closed deciduous broadleaves forests enhanced the vegetation cover of the area and reduced the possibility of recurrence of landslides. Land use types and spatial and temporal change patterns of landslides in Tianshui City provided scientific basis for the development, reuse and ecological restoration of disaster-damaged land in the region.

Keywords: landslides; disaster-damaged land; land use/cover change; transfer matrix; Tianshui City

中国 50% 以上的国土面积受到地质灾害威胁, 其中滑坡居多, 有 1/3 发生于黄土高原区, 导致农田损毁、植被破坏和水土流失加剧等生态地质环境问题, 同时造成重大人员伤亡和经济损失^[1-2]。区域地形地貌、地层岩性和地质构造等形成条件以及地震、降雨和人类活动等诱发因素共同控制着滑坡的发生^[3-4]。土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)则是诱发滑坡的重要人类活动因子之一^[5], 不合理的土地利用加剧滑坡的发生。

目前, 国内外学者^[6-8]关于滑坡的研究主要集中于滑坡特征、早期识别、监测预警、形成机制、易发性判别、危险性评价和敏感性制图等方面, 而 LUCC 是生态系统服务、粮食生产、森林资源、土地利用优化与管理等方面研究的热点^[9-11]。已有研究^[12-15]表明, 农用地、水域和农村建设用地周边及低覆盖度草地更易发生滑坡, 且持续影响土壤流失和区域土地利用转化; 林地、中高覆盖度草地、裸岩地、荒漠和苔原地区的滑坡敏感性较低。滑坡灾害治理与土地利用综合考虑, 其结果产生较好效益^[16], 粗放管理模式下滑坡后土地的利用几乎不变化^[17]。传统滑坡治理以保证稳定性和地质安全为主, 而作为一种土地资源再利用往往被忽视^[18]。如果将滑坡作为一种土地资源合理利用, 因地制宜, 既保证滑体的稳定性, 又合理配置与保护灾损土地, 减轻和消除滑坡的灾害性, 也满足生产或生态的需求。

综上, 滑坡与土地利用结合的研究主要分为 2 个方面: 以滑坡为核心, 将土地利用作为诱发滑坡的一项主要因子和评价指标参与滑坡易发性、危险性和敏感性评价, 并分析其相关性, 为区域国土空间规划和防灾减灾提供技术参考, 该方面研究成果丰硕^[13-14]; 以土地利用为核心, 重点开展滑坡后灾损土地的分析评价和开发再利用, 该方面研究相对滞后, 成果偏少, 尤其在黄土高原区。基于此, 通过探索分析天水市秦州区和麦积区滑坡发育的特征参数、1985—2020 年

滑坡区的土地利用类型及不同时序下土地利用转移趋势及原因, 对区内滑坡灾损土地的科学合理开发利用和生态环境保护修复具有启示意义和借鉴作用, 进一步提高区内综合防灾减灾能力。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

天水市位于甘肃省东南部, 陕、甘、川三省交界处, 地处陇中黄土高原南部, 渭河上游; 是黄土高原水土保持重点区, 中国滑坡灾害高发区之一, 也是甘肃省地质灾害重灾区之一^[19]。秦州区和麦积区是天水市的政治、经济、商业和文化中心, 总人口约 130 万, 总面积约 5 855 km², 其中秦州区约 2 373 km², 麦积区约 3 482 km²。地理位置 34°05′05″—34°49′40″N, 105°13′15″—106°42′58″E(图 1)。

天水市属暖温带半湿润半干旱气候, 年平均气温 11℃, 年平均降水量约 491.7 mm, 由东南向西北呈下降趋势。全区持续最大降雨量 286.6 mm, 最大日降雨量 113 mm, 最大小时雨量 57.3 mm, 每年 7—9 月降水量最多, 约占全年降水量的 70%, 常以集中暴雨的形式出现, 是引发各类地质灾害的重要因素。天水市位于六盘山南北地震带和秦岭北缘东西地震带的交汇部位, 发育凤凰山断裂、西秦岭北缘断裂和东秦断裂等多条断裂带, 区内地形起伏较大, 地层岩性多样^[20-21]。近年来, 天水市降雨集中、短时强降雨等因素造成滑坡灾害频发, 严重威胁着区内人民生命财产安全, 防灾减灾任务艰巨。

1.2 数据来源

1.2.1 滑坡数据 获取研究区 ALOS-12.5 m DEM 和高清遥感影像数据, 进行滑坡灾害室内遥感解译和 GIS 空间分析, 结合已有滑坡资料和野外实地调查, 得到研究区滑坡分布(图 1)。建立研究区滑坡空间分布数据集, 共识别滑坡灾害样本 469 个, 其中秦州区 257 个、麦积区 212 个, 累计滑坡区总面积 87.65 km²。

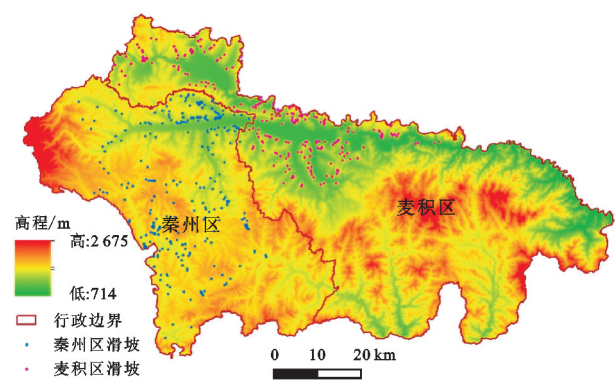


图 1 研究区位置与滑坡分布

1.2.2 土地利用数据 土地利用数据来源于中国科学院空天信息创新研究院刘良云团队(<https://data.casearth.cn/sdo/detail/5fbc7904819aec1ea2dd7061>),1985—2020 年全球 30 m 精细地表覆盖动态监测产品,共包含 29 个地表覆盖类型(联合国粮农组织的土地覆盖分类体系),细化了 5 种森林类型,更新周期为 5 年,总体精度82.5%^[22]。对下载的数据进行处理得到研究区 1985—2020 年 8 期土地利用类型(图 2),将 8 期土地利用类型图与识别的滑坡样本进行空间叠加分析,得到滑坡区的土地利用类型。主要的土地利用类型包括耕地(旱地、灌溉农田)、林地(封闭常绿阔叶林、封闭落叶阔叶林、封闭常绿针叶林)、草地(草本植物盖、草原)和不透水表面。

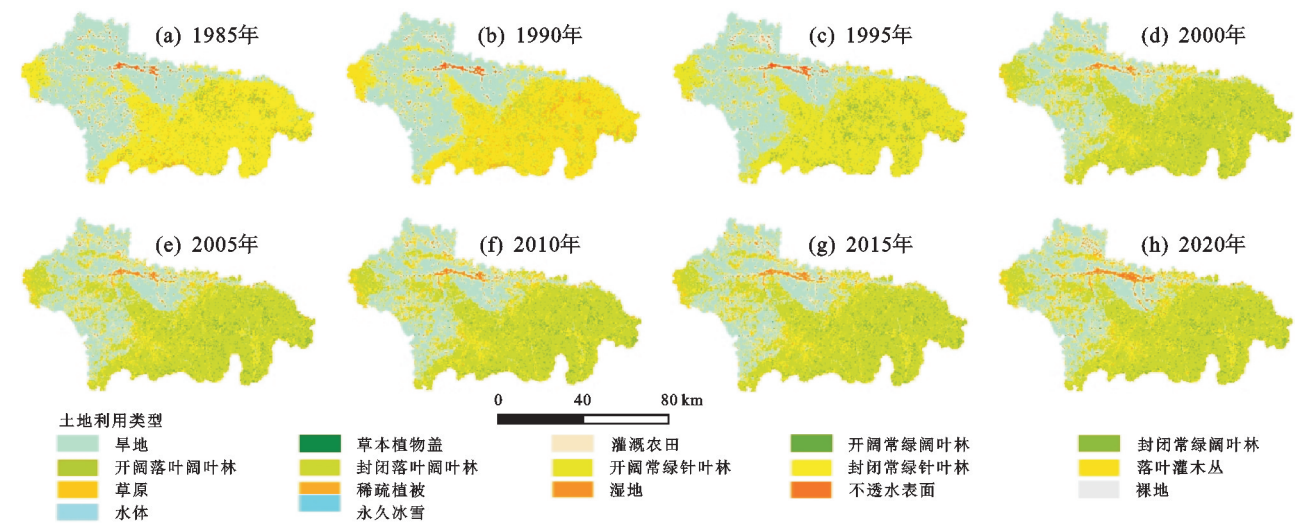


图 2 研究区 1985—2020 年土地利用类型

2 研究方法

2.1 基于 GIS 的滑坡特征参数提取

利用 ArcGIS 10.2 软件和研究区 12.5 m 分辨率的 DEM 数据,参考宿星等^[21]对滑坡特征参数的选取。在 ArcToolbox 中执行 Spatial Analyst,利用“表面分析”求得山体阴影、坡度和坡向;将滑坡面和处理后的数据叠加,利用“以表格显示分区统计”求得滑坡的平均高程、平均坡度、平均坡向、面积、前后缘相对高差;再利用“滑坡长度=高差/坡度”求得滑坡长度,最后分类统计 6 种滑坡特征参数。

2.2 基于 GIS 的滑坡土地利用类型统计

将识别的 469 个滑坡样本与 8 期土地利用类型图结合,利用 ArcGIS 中“多值提取至点”得到滑坡点土地利用类型;利用“以表格显示分区统计”的“MAJORITY”得到滑坡面土地利用类型;利用“VARITY”属性统计每个滑坡面不同年份的土地利用类型种类数;再利用“面积制表”统计滑坡区各土地利用类型面积。

2.3 土地利用/覆被净变化量指数

土地利用/覆被净变化量指数能够有效反映不同

土地利用类型某一时期内在数量上的绝对变化量百分比^[23],计算公式为:

$$D_j = |P_{+j} - P_{i+}| \tag{1}$$

式中: D_j 为特定时期内某区域土地利用/覆被净变化量百分比(%); P_{+j} 为特定时期内期末第*i*类土地利用类型面积百分比(%); P_{i+} 为特定时期内期初第*i*类土地利用类型面积百分比(%)。

2.4 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是依据同一区域不同时间的土地利用状况的动态转化关系得出的一个二维矩阵,可以直观地表示一段时间内土地利用的变化值和方向,揭示不同土地利用类型之间面积流动的时空演变^[24],计算方法为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: S_{ij} 为*i*类用地转为*j*类用地的土地面积(km²);*n*为不同土地利用的类型数量;*i*、*j*分别为转移前后的土地利用类型。

2.5 土地利用转移贡献率

为进一步明确不同土地利用类型的单项转移情况,在土地利用转移矩阵的基础上计算土地利用转移贡献率,从而明确不同土地利用类型间的转移情况^[25],计算方法为:

$$T_{ij} = \frac{A_{ij} - A_{ji}}{\sum_{i=1}^n (A_{ij} - A_{ji})} \quad (3)$$

式中: T_{ij} 为第 i 类土地利用类型转移贡献率(%); A_{ji} 表示第 i 类土地转移面积占第 j 类土地利用类型转移总面积的比例(%); A_{ij} 为第 i 类土地向第 j 类土地转移的面积(km^2); A_{ji} 为第 j 类土地向第 i 类土地转移的面积(km^2)。

3 结果与分析

3.1 滑坡特征参数统计

滑坡平均高程 1 003.7~1 888.1 m,按 200 m 的梯度分为 5 个等级,优势高程 1 200~1 400 m,发育 203 个滑

坡,占比达 43.28%;平均坡度间接影响滑坡发育与稳定性,研究区滑坡平均坡度 $7.7^\circ \sim 35.8^\circ$,按 5° 的梯度分为 6 个等级, $10^\circ \sim 15^\circ$ 发育 191 个滑坡,占比达 40.72%;滑坡平均坡向 $28.4^\circ \sim 327.6^\circ$,按坡向每 45° 为 1 个分带,分为 8 个分带,其中在西向坡发育 124 个滑坡,占比达 26.44%,北东、东、南东、南、南西、北西也较均匀地发育着滑坡;滑坡高差 19.0~416 m,按 50 m 的梯度分为 9 个等级,100~150 m 间发育 156 个滑坡,占比达 33.26%,高于 300 m 的高差发育的滑坡很少;滑坡面积介于 $0.45 \times 10^4 \sim 2.66 \times 10^6 \text{ m}^2$,按 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的梯度分为 11 个等级,显著分布于 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^2$,有 224 个滑坡,占比达 47.7%,随着面积的增加滑坡数量在减少;滑坡长度大小反映滑坡的滑动空间范围,研究区滑坡长度 61.5~1 819.4 m,按 200 m 的梯度分为 10 个等级,在 200~400 m 间发育 187 个滑坡,占比达 39.87%,200~2 000 m 的范围内,随着长度的增加滑坡数量逐渐减少(图 3)。

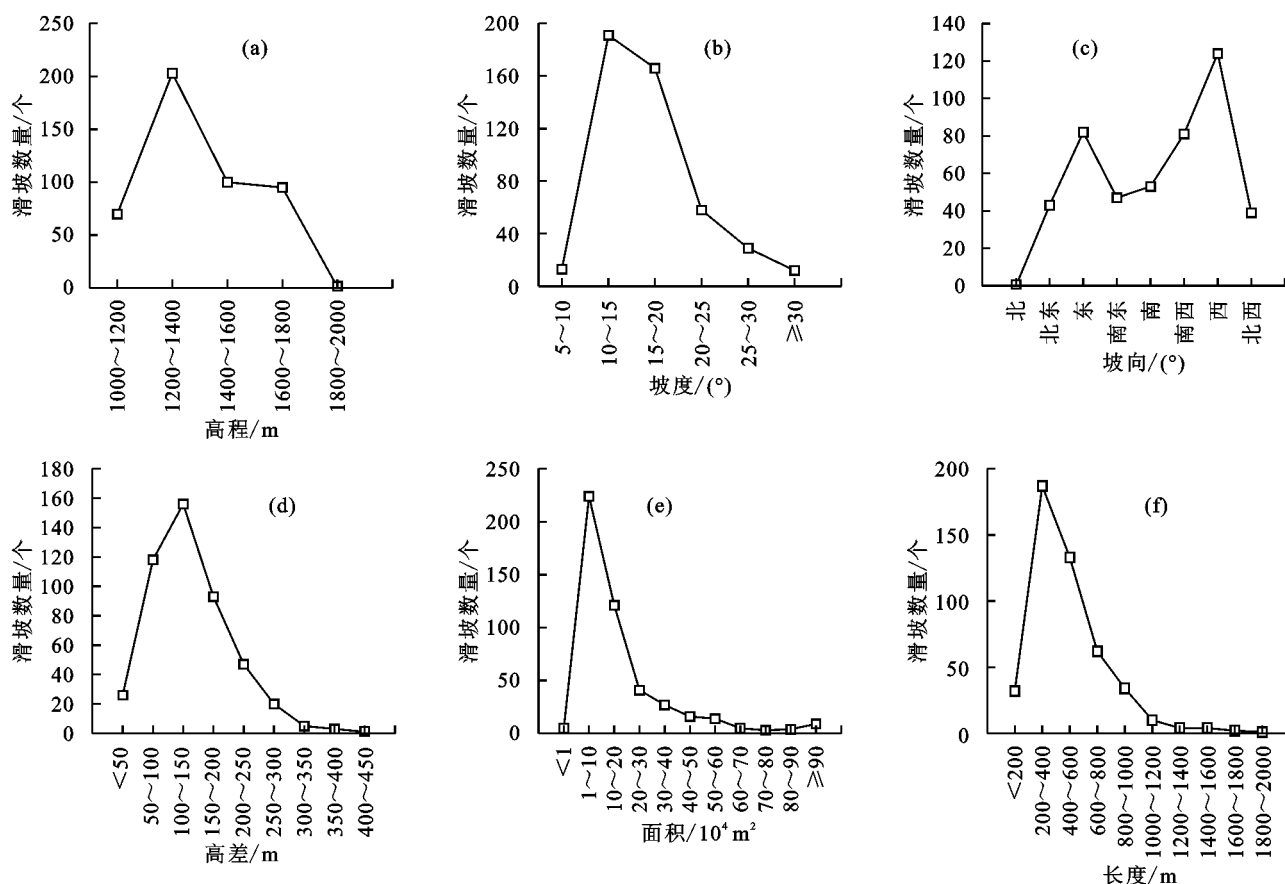


图 3 滑坡特征参数分级

滑坡特征参数统计表明,研究区滑坡发育具有一定的易发区间,这与天水市区的地质地貌背景和气候环境相关^[21]。整个研究区出露的地层主要为前震旦系(AnZ)、震旦系(Z)、前寒武系牛头河群(Pz1)、泥盆系(D)、石炭系(C)、侏罗系(J)、古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q)及花岗岩(γ),其中以第四系、新近系、古近系和泥盆系及花岗岩分布最广(图 4)。

依据滑坡物质组成和滑动面位置,可将研究区滑坡分为黄土-泥岩接触面滑坡、黄土-泥岩切层滑坡和纯黄土滑坡 3 种类型,其中黄土-泥岩接触面滑坡和黄土-泥岩切层滑坡为主要发育的滑坡类型。新生代以来天水市受构造隆升和气候变化作用,形成由新近系、古近系等泥质岩类组成的高低起伏的“古红土丘陵”地貌;第四系风积马兰黄土则以披覆形式堆

积在古红土丘陵之上,形成黄土丘陵,构成上部黄土、下部泥岩的“双层异质”斜坡结构,为区内滑坡的发育形成奠定了地形地貌和地质基础^[26]。研究区滑坡敏感性分析评价表明,地层岩性因子层中,第四系上更新统(Q₃)马兰黄土和新近系(N)泥岩为区内滑坡易发因子层,对滑坡的响应和敏感性最高^[27]。

3.2 滑坡土地利用/覆被特征

3.2.1 滑坡点土地利用/覆被类型 1985—2020 年研究区滑坡点的土地利用类型有旱地、灌溉农田、封闭常绿阔叶林、封闭落叶阔叶林、封闭常绿针叶林、草原和不透水表面 7 种(表 1)。旱地是滑坡点上最多的土地利用类型,1985—2020 年平均占比 81.05%,1990 年开始呈减少趋势;灌溉农田是滑坡点上最少的土地利用类型,8 期平均占比仅有 0.27%;封闭常绿阔叶林略多于灌溉农田,平均占比 0.35%;封闭落

叶阔叶林和封闭常绿针叶林在 1985—2020 年波动较小;草原从 1990 年开始逐年增加,2000 年增加趋势最明显,近些年保持为 80 个左右,是滑坡点次要土地利用类型;不透水表面从 5~11 个缓慢增加。总体而言,变化最明显的土地利用类型是旱地和草原,旱地先增加后减少,草原先减少后增加。

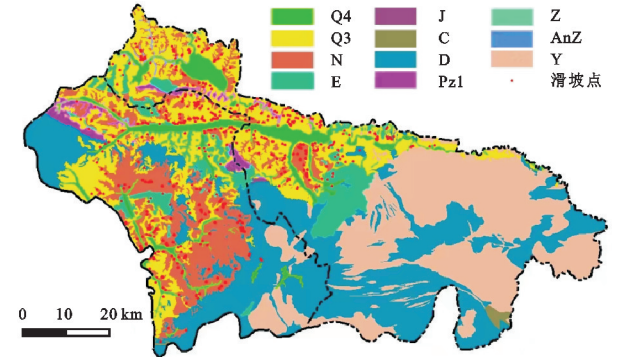


图 4 研究区地质分布

表 1 1985—2020 年滑坡点不同土地利用类型数量 单位:个

土地利用类型	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	平均占比/%
旱地	429	436	415	361	352	352	351	345	81.05
灌溉农田	0	0	0	2	2	2	2	2	0.27
封闭常绿阔叶林	0	3	0	2	2	2	2	2	0.35
封闭落叶阔叶林	19	20	24	23	25	25	25	24	4.93
封闭常绿针叶林	1	2	3	2	2	2	2	2	0.43
草原	15	3	21	73	79	79	80	83	11.54
不透水表面	5	5	6	6	7	7	7	11	1.43

3.2.2 滑坡面土地利用/覆被类型 1985—2020 年研究区滑坡面的土地利用类型有旱地、封闭常绿阔叶林、封闭落叶阔叶林、封闭常绿针叶林、草原和不透水表面 6 种(表 2)。土地利用变化明显的有旱地和草原,旱地逐年减少,草原逐年增加;封闭常绿阔叶林仅

在 1990 年出现 1 次;封闭常绿针叶林在 1995 年首次出现 1 个,后每年保持 2 个;封闭落叶阔叶林基本保持 20 个;不透水表面波动较小,每年约有 5 个。总体而言,滑坡面的土地利用类型以旱地为主,草原次之,与滑坡点的土地利用特征基本一致。

表 2 1985—2020 年滑坡面不同土地利用类型数量 单位:个

土地利用类型	1985 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
旱地	453	452	442	377	370	369	369	362
封闭常绿阔叶林	0	1	0	0	0	0	0	0
封闭落叶阔叶林	6	12	9	21	21	21	21	20
封闭常绿针叶林	0	0	1	2	2	2	2	2
草原	6	0	11	65	71	72	72	78
不透水表面	4	4	6	4	5	5	5	7

对 1985—2020 年单个滑坡面的土地利用类数进行统计,由表 3 可知,单个滑坡面利用类型以 2 种或 3 种居多。1985—2000 年滑坡土地仅有 1 种利用类型的逐年减少,1 种以上的逐年增加,2000 年最多达 8 种;2000 年以后单个滑坡土地利用类型变化较小,基本趋于稳定。总体上,单个滑坡面的土地利用方式趋于多样化。

3.2.3 滑坡区土地利用/覆被类型面积特征 对滑坡区不同年份土地利用类型面积进行详细统计,由表

4 可知,滑坡区旱地、草原、封闭落叶阔叶林和不透水表面的面积总和在 99% 以上,其余土地利用类型面积少,旱地面积占比呈明显的主导优势,但整体在逐年减少,1985—1995 年占比在 90% 以上,2000—2020 年降至 78% 左右;草原逐年增长,2020 年占比达到 13.09%,面积仅次于旱地;不透水表面、封闭落叶阔叶林、草本植物盖、封闭常绿针叶林和封闭常绿阔叶林所占比例在各个时期内波动性较小;灌溉农田先略增,后趋于平稳。

根据公式(1)计算得到 1985—2020 年 4 种主要土地利用类型净变化量指数(表 5)。旱地变化最多,35 年净变化量指数为 13.59%,依次是草原 9.11%,封闭落叶阔叶林 1.98%,不透水表面 1.77%;分段统计表明,1995—2000 年土地利用净变化量指数最大,总计 19.99%,其中旱地为 10.36%,草原为 8.50%;在 2000 年之前土地净变化量明显,2000 年之后变化量骤降,且波动较小,表明 2000 年前区域生态系统稳定性较差,后生态系统向好发展。总体上土地利用变化发生在 1985—2000 年。

表 3 1985—2020 年不同土地利用类型个数的滑坡量

年份	滑坡数量/个							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1985	115	169	120	48	15	1	1	0
1990	139	135	127	48	13	7	0	0
1995	96	175	146	39	10	2	1	0
2000	29	162	154	79	35	5	4	1
2005	26	168	154	75	34	7	5	0
2010	26	168	154	74	34	8	5	0
2015	26	168	152	75	32	11	5	0
2020	23	154	164	75	40	8	5	0

注:表头中 1~8 为土地利用类型数。

表 4 1985—2020 年滑坡区土地利用类型面积及占比

年份	项目	旱地	草原	不透水表面	封闭落叶阔叶林	草本植物盖	灌溉农田	封闭常绿阔叶林	封闭常绿针叶林
1985	面积/km ²	81.01	3.49	1.22	1.73	0.06	0	0.02	0.14
	比例/%	92.39	3.98	1.39	1.97	0.07	0	0.03	0.16
1990	面积/km ²	82.11	0.78	1.54	2.85	0.06	0.01	0.29	0.05
	比例/%	93.64	0.90	1.75	3.25	0.07	0.01	0.33	0.05
1995	面积/km ²	79.63	3.62	1.69	2.54	0.06	0.09	0.02	0.03
	比例/%	90.81	4.13	1.92	2.90	0.07	0.10	0.02	0.04
2000	面积/km ²	70.54	11.08	1.86	3.37	0.07	0.56	0.06	0.15
	比例/%	80.45	12.63	2.12	3.85	0.07	0.64	0.06	0.17
2005	面积/km ²	69.71	11.65	2.01	3.43	0.07	0.61	0.05	0.15
	比例/%	79.50	13.29	2.29	3.91	0.07	0.70	0.06	0.17
2010	面积/km ²	69.25	11.88	2.18	3.47	0.07	0.63	0.05	0.15
	比例/%	78.98	13.55	2.49	3.95	0.07	0.72	0.06	0.17
2015	面积/km ²	69.11	11.95	2.25	3.47	0.07	0.63	0.05	0.15
	比例/%	78.82	13.62	2.57	3.96	0.07	0.72	0.06	0.17
2020	面积/km ²	69.09	11.48	2.78	3.46	0.07	0.61	0.05	0.15
	比例/%	78.80	13.09	3.17	3.95	0.07	0.69	0.06	0.17

表 5 1985—2020 年滑坡区主要土地利用净变化量指数

单位:%

土地利用类型	1985—1990 年	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	1985—2020 年
旱地	1.25	2.83	10.36	0.95	0.52	0.16	0.02	13.59
草原	3.09	3.24	8.50	0.66	0.26	0.07	0.53	9.11
封闭落叶阔叶林	1.28	0.34	0.94	0.07	0.04	0	0.01	1.98
不透水表面	0.36	0.17	0.19	0.18	0.20	0.08	0.60	1.77

3.3 滑坡土地利用时空变化

3.3.1 土地利用转移矩阵分析 根据公式(2)计算得到滑坡区 8 期土地利用类型转移矩阵(表 6)。结果表明:(1)1985—1990 年,旱地的转入与转出几乎持平,约 0.28 km²转化为封闭落叶阔叶林,同期转入 0.27 km²,来源于封闭落叶阔叶林和草原,约 99.7%保持不变;草原总计转出 0.71 km²,转化为旱地和封闭落叶阔叶林;不透水表面没有发生转化,保持在 0.09 km²。(2)1990—1995 年,旱地转化类型多样,转化为封闭落叶阔叶林、封闭常绿针叶林、草原和不透水表面,分别有 0.06,0.01,0.39,0.09 km²,仅有 0.35 km²的封闭落叶阔叶林转入;封闭常绿阔叶林有 0.02 km²转化为封闭落叶阔叶林。(3)1995—2000

年,旱地以微弱的转入和显著的转出呈下降趋势,转化为封闭落叶阔叶林、封闭常绿针叶林和草原,分别有 1.60,0.01,4.44 km²,其中转为草原的最多,封闭落叶阔叶林也有 0.38 km²转化为草原。整体在这一阶段草原和封闭落叶阔叶林表现为显著的转入,均来自旱地。(4)2000—2015 年每 5 年土地利用转化非常少,15 年旱地累计约 0.43 km²转化为草原,草原累计约 0.13 km²转化为不透水表面,其他土地利用类型几乎无波动。(5)2015—2020 年,旱地转化为草原和不透水表面,分别有 1.32,0.11 km²;封闭落叶阔叶林有 0.04 km²转化为草原。(6)长时序来看,1985—2020 年旱地、封闭落叶阔叶林、草原和不透水表面分别保持不变的有 78.70,0.34,0.71,0.09 km²。

表 61985—2020 年滑坡区土地利用转移矩阵

单位:km²

时段	土地利用 类型	旱地	封闭落叶 阔叶林	封闭常绿 阔叶林	草原	不透水 表面	期初 总计
1985—1990 年	旱地	86.21	0.28	0	0	0	86.49
	封闭落叶阔叶林	0.04	0.33	0.02	0	0	0.39
	草原	0.23	0.48	0	0	0	0.71
	不透水表面	0	0	0	0	0.09	0.09
	期末总计	86.48	1.09	0.02	0	0.09	87.68
1990—1995 年	旱地	85.93	0.06	0.01	0.39	0.09	86.48
	封闭落叶阔叶林	0.35	0.73	0	0.01	0	1.09
	封闭常绿阔叶林	0	0.02	0	0	0	0.02
	不透水表面	0	0	0	0	0.09	0.09
	期末总计	86.28	0.81	0.01	0.40	0.18	87.68
1995—2000 年	旱地	80.23	1.60	0.01	4.44	0	86.28
	封闭落叶阔叶林	0.03	0.40	0	0.38	0	0.81
	封闭常绿针叶林	0	0	0.01	0	0	0.01
	草原	0.23	0	0	0.17	0	0.40
	不透水表面	0.09	0	0	0	0.09	0.18
2000—2005 年	期末总计	80.58	2.00	0.02	4.99	0.09	87.68
	旱地	80.19	0	0	0.39	0	80.58
	封闭落叶阔叶林	0	2.00	0	0	0	2.00
	封闭常绿针叶林	0	0	0.02	0	0	0.02
	草原	0	0	0	4.86	0.13	4.99
2005—2010 年	不透水表面	0	0	0	0	0.09	0.09
	期末总计	80.19	2.00	0.02	5.25	0.22	87.68
	旱地	80.15	0	0	0.04	0	80.19
	封闭落叶阔叶林	0	2.00	0	0	0	2.00
	封闭常绿针叶林	0	0	0.02	0	0	0.02
2010—2015 年	草原	0	0	0	5.25	0	5.25
	不透水表面	0	0	0	0	0.22	0.22
	期末总计	80.15	2.00	0.02	5.29	0.22	87.68
	旱地	80.15	0	0	0	0	80.15
	封闭落叶阔叶林	0	2.00	0	0	0	2.00
2015—2020 年	封闭常绿针叶林	0	0	0.02	0	0	0.02
	草原	0	0	0	5.29	0	5.29
	不透水表面	0	0	0	0	0.22	0.22
	期末总计	80.15	2.00	0.02	5.29	0.22	87.68
	旱地	78.73	0	0	1.32	0.11	80.15
1985—2020 年	封闭落叶阔叶林	0	1.96	0	0.04	0	2.00
	封闭常绿针叶林	0	0	0.02	0	0	0.02
	草原	0	0	0	5.29	0	5.29
	不透水表面	0	0	0	0	0.22	0.22
	期末总计	78.73	1.96	0.02	6.64	0.33	87.68
	旱地	78.70	1.62	0.02	5.91	0.24	86.49
	封闭落叶阔叶林	0.03	0.34	0	0.02	0	0.39
	草原	0	0	0	0.71	0	0.71
	不透水表面	0	0	0	0	0.09	0.09
	期末总计	78.73	1.96	0.02	6.64	0.33	87.68

对土地利用转移矩阵叠加可知,旱地转化最多,约 8.74 km²,转化为草原 6.58 km²、封闭落叶阔叶林 1.94 km²,不透水表面 0.20 km²,封闭常绿针叶林 0.02 km²;草原累计转化约 1.07 km²,转化为封闭落

叶阔叶林 0.48 km²、旱地 0.46 km²、不透水表面 0.13 km²;封闭落叶阔叶林累计转化约 0.86 km²,转化为草原 0.43 km²、旱地 0.41 km²,封闭常绿阔叶林 0.02 km²;其余土地利用类型占比少,转化微弱。1995—

2000 年转换面积最多,有 6.78 km²,4 种类型发生变化;2010—2015 年没有发生转化(图 5)。总体上,约 94%的旱地转化为林草地,主要为滑坡损毁的坡耕地进行退耕还林还草;后期出现少量旱地和草原转化为不透水表面,可能是滑坡区修建房屋和道路等建设用地,生产退化的旱地和生态退化的草地提供建设用地扩张所需的土地。

3.3.2 主要的土地利用转移贡献率分析 滑坡区土地利用净变化量指数在 1995—2000 年最大,因此,根据公式(3)计算 1995—2000 年和 1985—2020 年 2 期的主要土地利用类型转移贡献率(表 7)制作滑坡区土地利用变化图(图 6)。封闭落叶阔叶林的增加来源于旱地,1995—2000 年贡献率达到 131.93%,1985—2020 年贡献率达到 101.27%;草原的增加来源于旱地和封闭落叶阔叶林,1995—2000 年贡献率分别为 91.72%,8.28%;1985—2020 年贡献率分别为 99.66%,0.34%。从整个研究区来看,林草地显著增加,东南部变化最明显,靠近中心的西北部以点、面发生变化,发生土地利

用转移的滑坡面在整个滑坡区零散分布。1999 年起国家实施退耕还林(草)政策,并于 2014 年开启新一轮的退耕还林(草)^[28],天水市区落实“以粮换生态”的理念,开展了退耕还林工程和其他工程建设,提升区域生态环境质量。

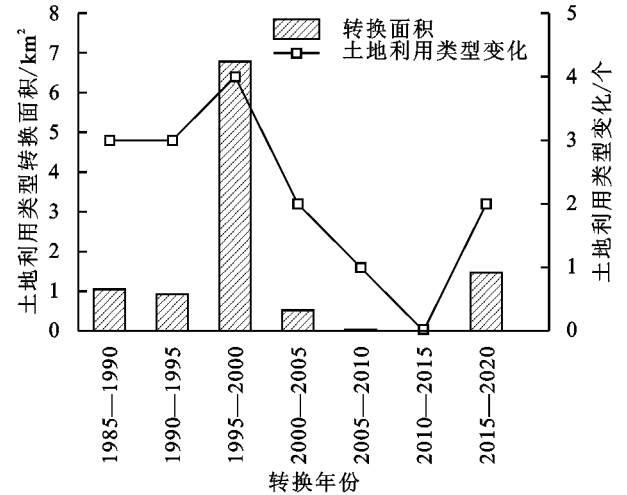


图 5 滑坡区时间序列土地利用转换

表 7 滑坡区主要土地利用转移贡献率

土地利用类型	1995—2000 年		1985—2020 年	
	变化量/km ²	贡献率/%	变化量/km ²	贡献率/%
旱地—封闭落叶阔叶林	1.57	131.93	1.59	101.27
草原—封闭落叶阔叶林	-0.38	-31.93	-0.02	-1.27
合计	1.19	100.00	1.57	100.00
旱地—草原	4.21	91.72	5.91	99.66
封闭落叶阔叶林—草原	0.38	8.28	0.02	0.34
合计	4.59	100.00	5.93	100.00

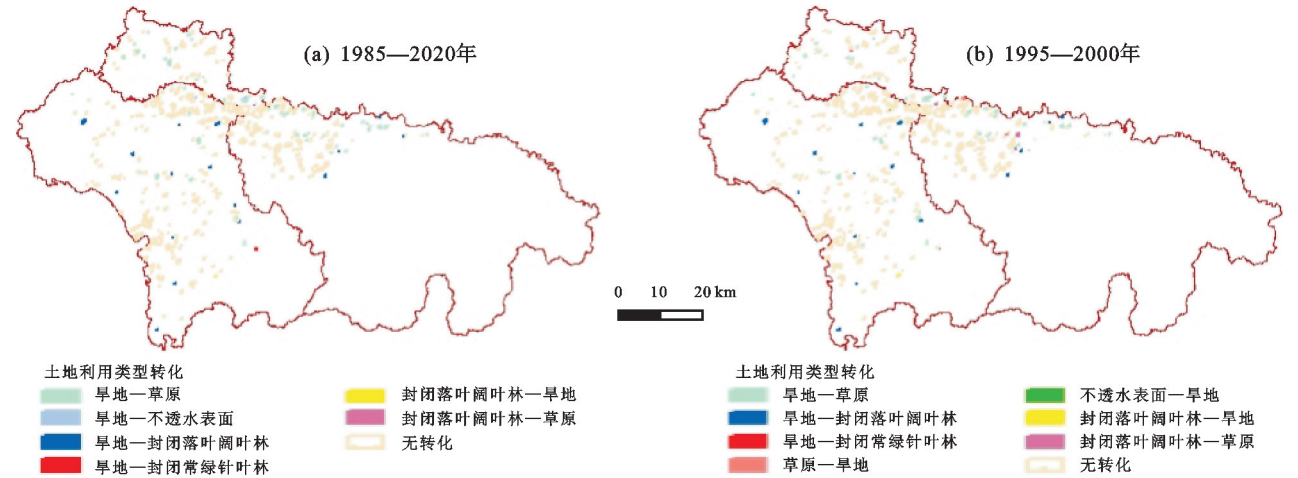


图 6 滑坡区土地利用变化

4 讨论

发生滑坡的区域生态环境敏感脆弱,区内土地利用方式亦受滑坡制约。滑坡区地形起伏较小,滑体释放能量后在较长时间内保持稳定状态,创造很多的平缓坡地,一些古老滑坡具有长期耕作史,有作为耕地的优势,且研究区降雨充沛,因此稳定后的滑体为区域提供大量靠天然降水种植的旱地,同时补充后备耕地资源的不

足。20 世纪初,技术进步和水库修建为农田的水利灌溉措施提供有力保障,开始出现灌溉农田;较平缓的地形也适宜修复为林地和草原,种植适合当地气候和土壤的封闭落叶阔叶林和草种。

滑坡区土地利用的变化是多种因素综合作用的结果^[15,23]。研究区 35 年间旱地主导变化量,主要转为林草地。区域长期的气候变化改变滑体的土壤和生态等条件,脆弱的滑坡土地经过长期的耕作导致地

力下降,加之频繁的人类活动等导致旱地逐年减少。人类思想意识和种植观念的改变,一些旱地变裸地;移民和交通条件的改变等导致建设用地需求增加,一些旱地转为不透水表面,为农民提供安居之所,一定程度上缓解了人地矛盾。而大规模的旱地转化为林草地,集中于1995—2000年,与退耕还林还草政策相关,其对区域的生态恢复产生积极效果,后期进行林草地的维护,所以变化不显著^[28-29]。滑坡土地的修复方式应尽可能减少再次发生滑坡的可能性,以前旱地面积90%以上,长时序下慢慢转化为林草地,相较旱地,林草地的滑坡敏感性更低^[12]。

依据研究结果对未来天水市滑坡土地的开发再利用提出建议:(1)科学开发再利用滑坡灾损土地。对滑坡土地及时识别,依据损毁程度和相关政策等,科学规划,保障区域土地资源供需平衡。(2)“开发+利用+管理”模式。加强对修复后土地使用过程中的监管力度和制度建设,可以建立滑坡灾损土地修复保护经济补偿制度,积极探索有示范意义的滑坡土地再利用模式。(3)滑坡土地修复与区域生态协调发展。未来修复时“宜农则农,宜草则草”,对破坏程度高,地形条件差的滑坡土地持续推进“退耕还林还草”,也可以发展半自然农田—景观生态系统。

5 结论

(1)研究区滑坡多发于平均海拔1 200~1 400 m、平均坡度10°~15°、平均坡向西向坡、前后缘相对高差100~150 m、面积 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^2$ 、长度200~400 m的区间。滑坡发育总体具有低高程、小高差、缓角度和中型规模等特点,区内地表形态变化较小,坡面侵蚀较弱。

(2)1985—2020年滑坡区共有8种土地利用类型,数量及面积最多的土地利用类型为旱地,草原次之;最少的土地利用类型为草本植物盖。旱地和草原总占比达90%以上,滑坡区土地宜农、宜草。

(3)1985—2020年滑坡区的土地利用类型呈现动态变化特征,可分为2个阶段:1985—2000年为持续变化阶段,2000—2020年为微弱调整阶段;其中1995—2000年变化最剧烈,主要表现为旱地向草原和林地转化。总体上,旱地累计转化最多约8.74 km²,转化为草原、封闭落叶阔叶林和不透水表面,其余土地利用类型占比微弱,基本无变化。

(4)单个滑坡体的土地利用方式逐年多样化,草原和封闭落叶阔叶林面积增加,提升区域的植被覆盖度,降低再次发生滑坡的可能性。

参考文献:

- [1] 李益敏,袁静,蒋德明,等.基于GIS的西南高山峡谷区滑坡风险性评价:以怒江州泸水市为例[J].西北师范大学学报,2021,57(6):94-102.
- [2] 李璇琮,梁延龙.地质灾害引发土地利用响应机制研究:以四川绵竹为例[J].西北地质,2022,55(1):236-248.
- [3] Sangchini E K, Emami S N, Tahmasebipour N, et al. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran[J].Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3):e201.
- [4] 赵美龄,郝利娜,许晓露,等.土地利用/覆被变化对地质灾害发育的影响研究[J].遥感技术与应用,2022,37(2):399-407.
- [5] Persichillo M G, Bordoni M, Meisina C. The role of land use changes in the distribution of shallow landslides[J].Science of the Total Environment, 2017, 574:924-937.
- [6] 马蓓青,杜玉鹏,王怀星,等.持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J].水土保持学报,2021,35(5):50-56.
- [7] 王涛,刘甲美,栗泽桐,等.中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J].中国地质,2021,48(1):21-39.
- [8] Tayyebi S M, Pastor M, Stickle M M, et al. SPH numerical modelling of landslide movements as coupled two-phase flows with a new solution for the interaction term[J].European Journal of Mechanics/B Fluids, 2022, 96:1-14.
- [9] 左妍,周勇,李晴,等.鄂西南地区土地利用格局时空变化及轨迹特征分析[J].水土保持学报,2022,36(1):161-169.
- [10] Hasan S S, Zhen L, Miah M G, et al. Impact of land use change on ecosystem services: A review[J].Environmental Development, 2020, 34:e100527.
- [11] 何春阳,张金茜,刘志锋,等.1990—2018年土地利用/覆盖变化研究的特征和进展[J].地理学报,2021,76(11):2730-2748.
- [12] 叶润青,李士焱,郭飞,等.基于RS和GIS的三峡库区滑坡易发程度与土地利用变化的关系研究[J].工程地质学报,2021,29(3):724-733.
- [13] Liu J, Wu Z, Zhang H W. Analysis of changes in landslide susceptibility according to land use over 38 years in Lixian County, China[J].Sustainability, 2021, 13(19):e10858.
- [14] Chen L X, Guo Z Z, Yin K L, et al. The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuan'en County (Hubei, China)[J].Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(10):2207-2228.

- [15] Barman D. A study of landuse/landcover pattern in inducing landslide hazards in parts of almora and nainital districts of uttarakhand[J]. International Journal of Innovative Research and Development, 2014, 3(10): 146-162.
- [16] 王绍求, 李梦照. 地质灾害综合治理与土地综合利用探讨: 以连南大掌村代间组、表达组滑坡为例[J]. 冶金管理, 2021(13): 82-83.
- [17] Kroh P. Analysis of land use in landslide affected areas along the Lososina Dolna Commune, the Outer Carpathians, Poland [J]. Geomatics Natural Hazards and Risk, 2017, 8(2): 863-875.
- [18] 魏万鸿, 叶伟林, 宿星, 等. 高速远程滑坡体的超稳性及滑坡土地的开发利用[J]. 中国水土保持, 2017(10): 58-61, 72.
- [19] 钟秀梅, 李伟利, 袁中夏, 等. 地震作用下天水市区滑坡危险区划研究[J]. 国际地震动态, 2019(8): 118-119.
- [20] 宿星, 魏万鸿, 郭万钦, 等. 基于 SRTMDEM 的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 616-622.
- [21] 宿星, 孟兴民, 王思源, 等. 陇中黄土高原典型地区滑坡特征参数统计及发育演化机制研究: 以天水市为例[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 319-330.
- [22] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, et al. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2753-2776.
- [23] 肖东洋, 牛海鹏, 闫弘轩, 等. 1990—2018 年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 271-281, 326.
- [24] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244-250.
- [25] 张云亮, 曾建军, 胡想全, 等. 基于土地转移矩阵的疏勒河中游土地利用变化研究[J]. 人民长江, 2017, 48(21): 34-39.
- [26] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土—泥岩接触面滑坡的特征与成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1167-1175.
- [27] Su X, Meng X M, Ye W L, et al. Multiple statistical models based analysis of causative factors and loess landslides in tianshui city, China [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (ICEPP 2017), 2018, 120(1): e012013.
- [28] Li S D, Liu M C. The development process, current situation and prospects of the conversion of farmland to forests and grasses project in China [J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(1): 120-128.
- [29] 刘春芳, 李鹏杰, 刘立程, 等. 西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 254-263.
- (上接第 194 页)
- [15] 张玉臻, 陈阳, 王洁, 等. 黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 251-261.
- [16] 李林山, 赵宏波, 郭付友, 等. 黄河流域城市群产业高质量发展时空格局演变研究[J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1751-1762.
- [17] 李欣, 殷如梦, 方斌, 等. 基于“三生”功能的江苏省国土空间特征及分区调控[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 1833-1846.
- [18] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应: 以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学, 2018, 38(1): 97-106.
- [19] 孙云华, 郭涛, 崔希民. 昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 245-254.
- [20] Aldwaik S Z, Pontius R G. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 106(1): 103-114.
- [21] 牛乐乐, 张必成, 贾天忠, 等. 青海省海西州土地利用变化强度分析与稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 152-159.
- [22] 杨建新, 龚健, 高静, 等. 国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征: 以武汉市为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 701-716.
- [23] Huang J L, Pontius R G, Li Q S, et al. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China [J]. Applied Geography, 2012, 34(3): 371-384.
- [24] Mallinis G, Koutsias N, Arianoutsou M. Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490(4): 262-278.
- [25] 田立鑫, 韩美, 王敏, 等. 莱州湾南岸海岸带土地利用时空演变及稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 259-265.
- [26] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.