

引用格式: 秦帮策, 方维萱, 张建国, 贾润幸, 肖文进. 基于景观单元稳定性的晋中盆地北部区域地壳稳定性评价[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 165-182.

QIN Bangce, FANG Weixuan, ZHANG Jianguo, JIA Runxin, XIAO Wenjin. Crustal stability in northern Jinzhong Basin of China based on the stability of landscape units [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 165-182.

## 基于景观单元稳定性的晋中盆地北部区域 地壳稳定性评价

秦帮策<sup>1,2</sup>, 方维萱<sup>1,2\*</sup>, 张建国<sup>2</sup>, 贾润幸<sup>2</sup>, 肖文进<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650000; 2. 有色金属矿产地质调查中心 矿山生态环境资源创新实验室, 北京 100012)

**摘要:** 晋中盆地北部是山西省太原—晋中城市群扩建重点地区, 研究该区域景观单元稳定性和区域地壳稳定性对于当地城市群及景观规划具有重要意义。已有研究从活动断裂和地裂缝等地质灾害角度对局部场地安全问题进行了探讨, 但关于整体性的景观单元稳定性和区域地壳稳定性定量评价仍较缺乏。本文通过构造岩相学五维一体综合方法, 对晋中盆地北部进行了景观单元划分和景观年代物质学研究, 从景观异质性及景观演化角度分析了景观单元的稳定性, 并且在此基础上进行了构造岩相学视角下的区域地壳稳定性定量评价。结果表明: (1) 晋中盆地北部侵蚀性中低山基岩景观区景观单元稳定性相对较高, 盆地过渡带景观区及河流湿地水城区景观单元稳定性相对较低。(2) 区域地壳相对稳定区面积占比为 45%, 主要分布在汾河冲积平原区和南东部的侵蚀性中低山基岩景观区, 相对不稳定区面积占比为 33%, 主要分布在盆地过渡带景观区和山前倾斜洪积平原区。(3) 区域地壳稳定性决定了景观单元稳定性, 景观单元稳定性是区域地壳稳定性的表现之一。本研究可为晋中盆地北部工程场址选择、景观格局优化及区域减灾防灾提供科学参考。

**关键词:** 区域地壳稳定性; 构造岩相学; 五维一体; 景观单元稳定性; 晋中盆地北部

**中图分类号:** P642.4

**文献标志码:** A

早在 20 世纪 60 年代, 李四光教授提出在活动构造带内选择相对稳定的安全岛, 区域地壳稳定性评价开始萌芽<sup>[1]</sup>。经过 60 余年发展, 区域地壳稳定性评价理论观点已然系统化、完善化及多极化<sup>[2-6]</sup>, 随着计算机技术的融入, 评价方法变为数值化、量化乃至智能化<sup>[7-10]</sup>。以往学者已通过指标评价法、模糊数学评价法、布尔法及层次分析法等诸多方法, 耦合地壳表生环境及内部构造环境一系列评价指标, 对全球多个地区进行了区域地壳稳定性评价<sup>[4-13]</sup>。然而在以往评价中, 未涉及景观单元稳定

性对区域地壳稳定性的影响, 在实际情况中这种影响尤为显著<sup>[14-17]</sup>, 如我国滇西北高原峡谷区, 脆弱的景观生态系统一定程度上提高了滑、崩、流等地质灾害的易发性, 导致当地区域地壳稳定性中的地表稳定性降低<sup>[18]</sup>。因此, 将景观单元稳定性与区域地壳稳定性进行耦合研究, 有利于完善区域地壳稳定性评价的评价体系和评价结果, 是区域地壳稳定性研究领域新的研究方向。

晋中盆地北部的清徐县、太谷县及榆次区是太原—晋中城市群扩建的重点地区, 人口约 800 万

收稿日期 (Received date): 2021-07-02; 改回日期 (Accepted date): 2022-04-11

基金项目 (Foundation item): 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190593) [Geological Survey Project of China Geological Survey (DD20190593)]

作者简介 (Biography): 秦帮策 (1995-), 男, 硕士, 河北张家口人, 主要研究方向: 环境与地质灾害。[QIN Bangce (1995-), male, M. Sc., born in Zhangjiakou, Hebei province, research on environmental and geological disaster] E-mail: 2265468107@qq.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 方维萱 (1961-), 男, 研究员, 理学博士, 陕西蓝田人, 主要研究方向: 沉积盆地与造山带、矿产普查与勘探。[FANG Weixuan (1961-), male, researcher, Ph. D., born in Lantian, Shaanxi province, research on sedimentary basins and orogenic belts, mineral survey and exploration] E-mail: 569026971@qq.com

(占山西人口总数 1/5),大西客运专线自北向南贯穿而过,山西省转型综改示范区——潇河产业园区坐落其上。该地区从山地到盆地内部分布的景观单元依次为侵蚀性中低山基岩景观区、盆山过渡带景观区、山前倾斜洪积平原区、汾河冲积平原区、河流湿地水域区,频繁发生的地壳失稳现象(如地裂缝、滑坡、地面塌陷及小型地震),对当地的景观格局及工程建筑带来严重破坏<sup>[19-22]</sup>。因此,在晋中盆地北部进行基于景观单元稳定性的区域地壳稳定性评价,可为该地区景观格局优化及工程场址选择提供参考,对太原—晋中城市群扩建及生态环境修复具有重要意义。

本文采用空间-物质-时间多维一体构造岩相学创新研究方法<sup>[23-24]</sup>,通过分析晋中盆地北部景象特征及沉积物物质年代特征,研究了空间域内景观单元分布及格局构型,时间域、物质域内景观的演化过程(5 万年以来)和景观单元宏观形成速度,定性评估了景观单元的稳定性,进而在构造岩相学视角下定量评价了区域地壳稳定性,探讨了景观单元稳定性和区域地壳稳定性之间的关系,

以为晋中盆地北部景观格局布局及国土空间规划提供科学参考。

## 1 研究区概况

晋中盆地位于山西省太原市南部,地理位置为  $111^{\circ}30' \sim 113^{\circ}10' \text{E}$ ,  $37^{\circ}05' \sim 37^{\circ}55' \text{N}$ (图 1),属温带干旱-半干旱大陆性季风气候区。晋中盆地整体呈东北向菱形展布,具有“两山夹一盆”盆山镶嵌景观地貌特征,地势呈西高东低(图 1)。盆地东侧为太岳山脉,海拔在 1300 ~ 1700 m 之间,最高峰为介休茶山,海拔为 2120 m,西侧为吕梁山脉,海拔在 1500 ~ 1800 m 之间,最高峰为关帝山,海拔为 2830.7 m,盆地内部平均海拔为 700 m(图 1)。盆地东部地貌类型从侵蚀性中低山地,到黄土丘陵、黄土塬、梁、峁,再到盆地内部冲积平原缓慢过渡,西部受活动断裂影响显著,地貌类型从侵蚀性中低山地急剧下降为盆地内部冲洪积平原,盆地内部河谷地貌发育,汾河、潇河、乌马河及象峪河等众多河流分布其中(图 1)。晋中盆地内年均气温约  $9.5^{\circ}\text{C}$ ,年

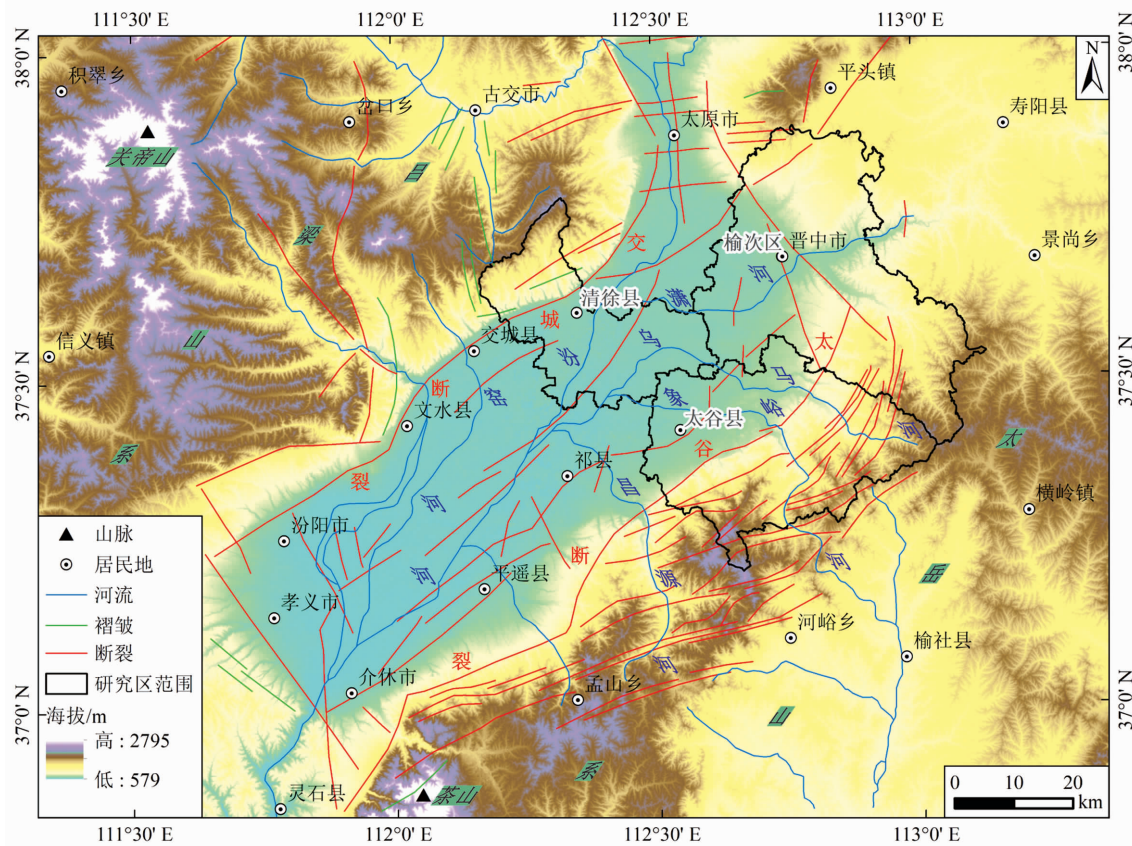


图 1 晋中盆地地貌特征及构造分布图

Fig. 1 Geomorphic features and tectonic distribution map of Jinzhong Basin, China

均降水量约 470 mm,降水主要集中在 6—8 月,年均蒸发量约 1765 mm,为年均降雨量的 4 倍。

大地构造背景上,晋中盆地位于汾渭地堑系中部、华北地块西部,北临兴蒙造山带,南抵秦岭造山带,西与鄂尔多斯地块接壤(图 2)。受陆内构造作用影响,经燕山期和喜山期区域地壳隆升和陆内造山作用后,在上新世初开始断陷成盆并接受陆相沉积充填<sup>[25]</sup>。晋中盆地地下基底构造层为太古界—奥陶系稳定古陆核地块,中基底构造层为石炭系—三叠系以区域褶皱为特征的地层,上基底构造层为侏罗系—古近系盆山镶嵌+碱性侵入岩地层。盆地边缘分布一系列控盆活动断裂,北西缘为交城断裂,南东缘为太谷断裂,盆地内部隐伏断裂发育(图 1)。晋中盆地的新构造运动以控盆断裂活动为主(一般以垂直运动占优势),以控盆断裂为边界,边山隆升,盆地下降。在新构造运动控制下,上新世以来,晋中盆地内部沉积了巨厚的河湖相沉积物,西部最厚可达 3800 m,盆地边缘沉积了湖岸山地风成黄土。

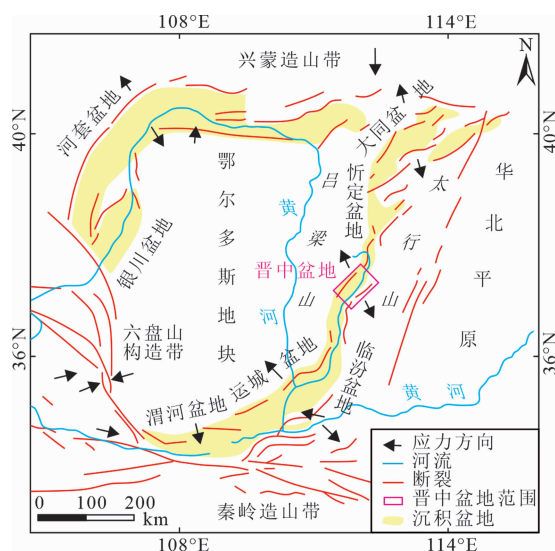


图 2 晋中盆地区域构造位置图

Fig. 2 Regional tectonic location map of Jinzhong Basin, China

晋中盆地人文历史宏厚,人口分布密集,社会交通发达,产业门类齐全,经济增长迅速。与此同时,晋中盆地的生态环境问题也日益突出,环境破坏、水资源短缺、水土污染及地裂缝、地面沉降等不良地质现象成为当前面临的主要生态环境问题。晋中盆地内市级行政区包括太原市、晋中市、介休市、孝义市等,县级行政区包括清徐县、太谷县、榆次区、平遥县、祁县等,本文研究区为晋中盆地北部的清徐县、

太谷县及榆次区(图 1),累计面积约 3000 km<sup>2</sup>,占晋中盆地整体面积的 1/2。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及预处理

本文收集的图件包括晋中盆地区域地质图(1:20 万)、晋中盆地北部地质灾害分布图(1:5 万)、山西省地震动峰值加速度标准图(1:400 万)、山西省构造体系和地震规律分布图(1:50 万)及华北地区大地热流等值线图;矢量数据包括:晋中盆地地理要素、山西省 DEM 数据(30 m)、2018 年山西省土地利用类型数据(1 km)、2020 年山西省土地利用类型数据(30 m)。这些图件及矢量数据由中国地质调查局水文地质环境地质调查中心、山西省地质调查院和中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供。

将以上图件及矢量数据导入 Arcgis10.8 软件进行空间配准,使用清徐县、太谷县和榆次区的县界对其余数据进行裁剪。对 DEM 数据进行等值线分析和坡度分析,获得研究区高程和坡度数据,对 1 km 和 30 m 精度的两期土地利用类型数据进行重分类,将研究区的土地类型分为林地、草地、耕地、建设用地和水域五类(无裸地),获得研究区内的土地利用类型数据(1 km 和 30 m),在其余图件中提取断裂、地质灾害类型及分布、地震点及震级、地震峰值加速度等值线、大地热流值等值线、地层岩性分布一系列信息进行矢量化,获得相应矢量数据。

### 2.2 景观单元空间研究

#### 2.2.1 景观单元定义

本文中基于构造岩相学定义下的景观单元是指在一定时间和空间结构上,岩石组合、地形地貌、地质构造、景观格局构型、生态系统等综合反映出的相对均质的地质-地理-生态景象单元,该景观单元具有综合集成特征,在体现地质和地理现象的同时也体现了景观生态学现象。

#### 2.2.2 景观单元划分

不同景观单元的地质-地理-生态景象具有异质性特征,这种综合景象异质性主要体现在高程、坡度、岩性、构造及土地分类等方面。研究区内的高程、坡度、岩性、构造类型、土地利用类型(1 km)、断裂线密度和长度的空间分布规律如表 1 和图 3 所



表 1 景象分布特征

Tab. 1 Scenery distribution characteristics

位置	高程/m	坡度/(°)	岩性	构造类型	土地利用类型	断裂线密度/ (条/km)	断裂平均 长度/km
盆地内部	< 800	< 10	以黏土类土、粉土及砂类土为主	隐伏断裂	耕地和建设用地	0.08	45
盆山过渡区	800 ~ 950	10 ~ 25	以砾石、砂类土及粉土为主,少量黏土	控盆断裂	草地和建设用地	0.15	110
山地地区	> 950	> 25	砂岩、泥岩、页岩等基岩	断裂和褶皱	林地和草地	0.34	25

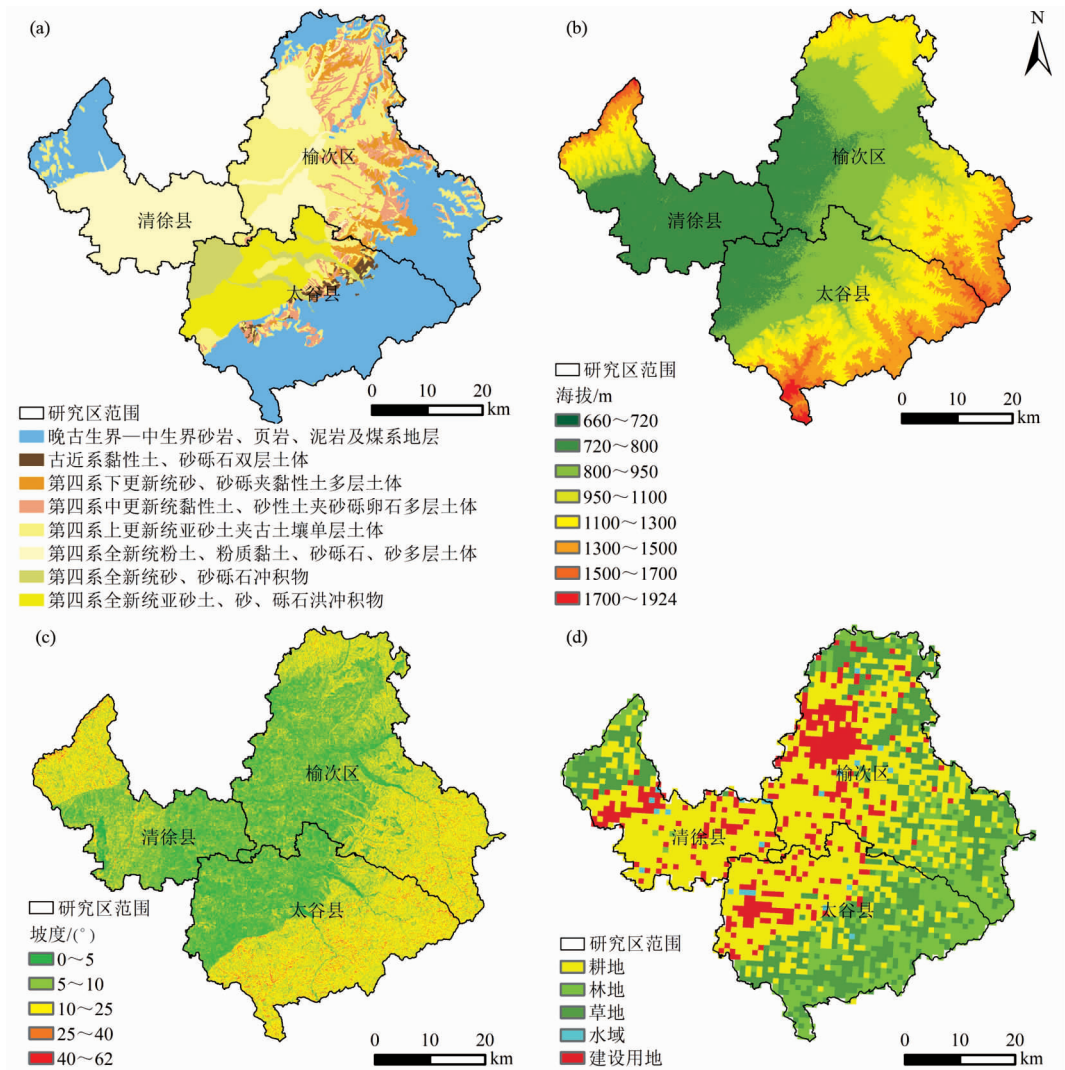


图 3 景象异质性分布图:(a)地层岩性;(b)高程;(c)坡度;(d)土地分类(2018 年)

Fig. 3 Distribution map of scene heterogeneity: (a) stratum lithology; (b) elevation; (c) slope; (d) land classification (2018)

示,依据这些景象的空间异质性分布特征,结合实地调查,将研究区划分为侵蚀性中低山基岩景观区、盆山过渡带景观区及山间开流盆地景观区,将山间开流盆地景观区进一步划分为山前倾斜洪积平原区、汾河冲积平原区及河流湿地水域区。

2.2.3 景观格局构型分析

景观格局构型分析主要是从景观生态角度研

究各景观单元内的斑块、廊道和基质的空间配置。研究区内的廊道主要为河流和各类型道路,斑块主要为森林、草地、耕地及城镇,因此,将研究区范围内的各类型道路和 30 m 精度的土地利用类型数据进行融合,进而与景观单元的划分结果耦合叠加,以分析各景观单元内的斑块类型、组合方式和廊道线密度。



## 2.3 景观单元物质及年代研究

### 2.3.1 剖面调查及钻孔勘查

晋中盆地的成盆模式为断陷沉积成盆,因此研究景观单元内的沉积物特征和年龄是进一步分析景观形成年代及演化的前提。因侵蚀性中低山基岩景观区主要分布二叠系—三叠系的砂岩、泥岩、页岩和煤层,直观判别为盆地的晚古生界—中生界褶皱基底,河流湿地水域区野外作业较为困难,故选取盆山过渡带景观区、山前倾斜洪积平原区及汾河冲积平原区,通过地表剖面调查、钻孔勘查、光释光测年和 $C^{14}$ 测年综合方法对沉积物特征及年龄展开研究。盆山过渡带景观区和山前倾斜洪积平原区天然剖面发育良好,而汾河冲积平原区内未见剖面,因此在前者地区进行剖面调查,在后者地区进行钻孔勘查(图4)。对地表剖面及钻孔揭示的沉积物进行岩性识别、岩性分层、沉积相判定及年龄分析,进而研究沉积序列结构及沉积年代,分析景观形成年代和演化模式。

### 2.3.2 测年试验

在沉积物年龄测试试验中,光释光测年试验在天津地调中心实验室进行, $C^{14}$ 测年试验在河北地质

实验测试中心进行。在年龄样采取过程中,严格遵守采样规则,光释光测年样品避免曝光, $C^{14}$ 测年样品采取炭质含量高的沉积物。

光释光测年试验采用单片再生剂量法(SAR)进行,使用的仪器为丹麦生产的 Risø - TL/OSL - 20 热/光释光测量仪,样品中的 U、Th、K、Rb 放射性元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP - MS)测量。 $C^{14}$ 测年试验采用液体闪烁计数法进行,将样品中的碳提纯并制备成苯,在苯中加入闪烁液,通过型号为 wallac Quantulus - 1220 的超低本底液体闪烁能谱仪对 $\beta$ 粒子进行测量。

## 2.4 景观单元稳定性分析

通过岩性、高程、坡度、断裂线密度、断裂长度、斑块类型、廊道线密度及景观单元形成速度来分析景观单元稳定性。岩性方面,基岩的岩石强度及能干性较高,稳定性较高;粒度相差较大的沉积物密实度较高,固结度较基岩低,故稳定性次之;细粒沉积物在遇水后结构易于破坏,易发生湿陷性,稳定性较低<sup>[26]</sup>。高程和坡度方面,地势越高坡度越大,坡体应力值越高,降水、风力和流水等的侵蚀作用越强,

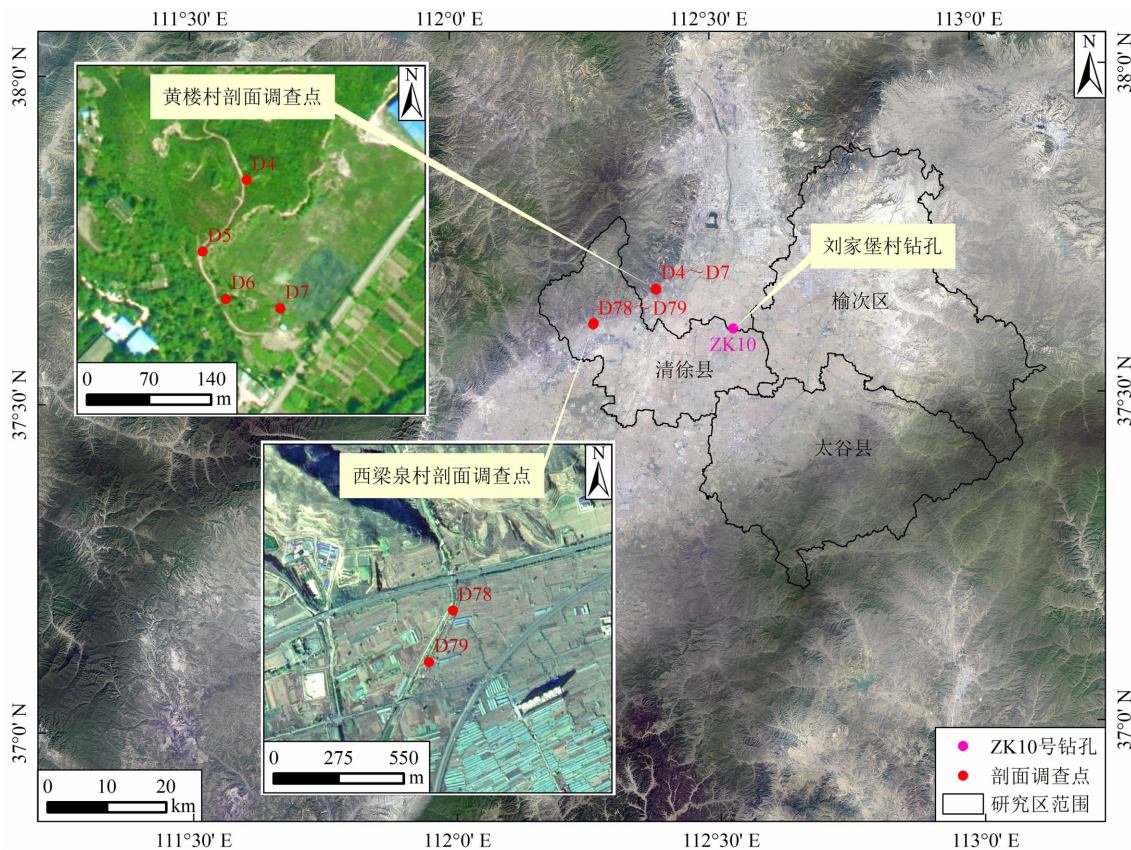


图4 剖面调查点及 ZK10 孔位置图

Fig.4 Sectional survey points and the location map of hole ZK10

稳定性越低。断裂方面,断裂线密度和断裂规模越大,其附近的岩土体碎裂程度越高,易形成地表水高下渗带,稳定性越低。景观格局构型方面,廊道线密度越大(研究区主要为道路廊道,其线密度体现了人类活动对景观的干扰),原生景观格局破碎程度越高,稳定性越低;森林、草地、水域等自然斑块对景观保护、水土保持及生态系统修复具有重要作用,此类自然斑块在景观格局中比重越大,景观稳定性越高。景观单元形成速度方面,通过各景观单元的已知厚度与相应厚度的形成时间之比,来宏观表示景观单元形成速度,景观单元形成速度越快,表生环境和内部构造越活跃,稳定性越低。

依据以上景观稳定性评判原则和各景观单元内的岩性、高程、坡度等的分布特征,首先从一系列单因素角度分析各景观单元的稳定性,进而分析每个单因素的重要性,最后综合分析研究区各景观单元的稳定性。

## 2.5 区域地壳稳定性评价

### 2.5.1 指标选取

影响区域地壳稳定性的因素可系统概括为内动力因素、外动力因素及介质因素。内动力因素体现在断裂活动、构造应力场、地震活动等直接对区域地壳稳定性造成影响,外动力因素体现在表生环境不稳定诱发的地质灾害间接对区域地壳稳定性造成影响,岩土体是内、外动力影响因素的介质条件。前文所述的一系列景观单元稳定性的影响因素同时也是区域地壳稳定性的影响因素,并且在内、外动力和介质 3 个方面均有体现,所以景观单元稳定性对区域地壳稳定性具有一定的指示作用。鉴于此,在将岩性、高程、坡度、断裂线密度、断裂长度、斑块类型、廊道线密度和景观单元形成速度 8 个因素作为区域地壳稳定性评价指标的基础上,补充选取断裂活动性、地震震级、地震峰值加速度、大地热流值及地质灾害面密度 5 项评价指标,共计 13 项评价指标,对研究区进行区域地壳稳定性定量评价,补充选取的 5 项指标在研究区的分布情况如图 5 所示。

### 2.5.2 分级标准和评价体系构建

以上各评价指标分别从平面维度(表生环境,  $x-y$ )、立体维度(内部构造环境,  $z$ )、物质维度(岩性,  $M$ )及时间维度(景观单元形成速度,  $T$ )决定着区域地壳的稳定程度,由此建立空间-物质-时间五维一体( $x, y, z, T, M$ )构造岩相学视角下的区域地

壳稳定性评价体系,评价体系中,将区域地壳稳定性分为 4 个等级,即稳定、次稳定、次不稳定和不稳定,各指标权重通过层次分析法确定。

### 2.5.3 评价流程

本次评价采用指标评价法,依据建立的构造岩相学区域地壳稳定性评价体系,通过 Arcgis10.8 平台进行定量评价。首先将岩性、高程、坡度、斑块类型、廊道线密度、断裂线密度、断裂长度、断裂活动性、景观单元形成速度及地质灾害面密度,以景观单元为单位进行区域地壳稳定性分级,进而对地震峰值加速度、地震震级及大地热流值进行稳定性分级。对分级后的矢量数据采用“4 分制”的方式进行打分,稳定为 4 分,次稳定为 3 分,次不稳定为 2 分,不稳定为 1 分。将打分后的矢量数据按照打分字段进行栅格化处理(栅格化精度为  $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ ),其中地震点为点文件,采用反距离权重插值法栅格化,其余文件为面文件,直接面转栅格。在栅格化后的数据中选择岩性、高程、坡度、断裂线密度、断裂长度、地质灾害面密度、斑块类型及廊道线密度系列栅格进行加权叠加,完成区域地壳稳定性平面和物质维度评价,选择断裂活动性、地震峰值加速度、地震震级、景观单元形成速度及大地热流值系列栅格进行加权叠加,完成区域地壳稳定性立体和时间维度评价。最后,利用区域地壳稳定性综合判别矩阵(表 2),对研究区的区域地壳稳定性分级进行综合

表 2 区域地壳稳定性综合判别矩阵

Tab.2 Comprehensive discriminant matrix of regional crustal stability

综合分级	立体和时间纬度稳定性	平面和物质纬度稳定性
稳定	稳定	稳定
稳定	稳定	次稳定
次稳定	稳定	次不稳定
次稳定	次稳定	稳定
次稳定	次稳定	次稳定
次不稳定	稳定	不稳定
次不稳定	次稳定	次不稳定
次不稳定	次稳定	不稳定
次不稳定	次不稳定	稳定
次不稳定	次不稳定	次稳定
次不稳定	不稳定	稳定
不稳定	次不稳定	次不稳定
不稳定	次不稳定	不稳定
不稳定	不稳定	次稳定
不稳定	不稳定	次不稳定
不稳定	不稳定	不稳定

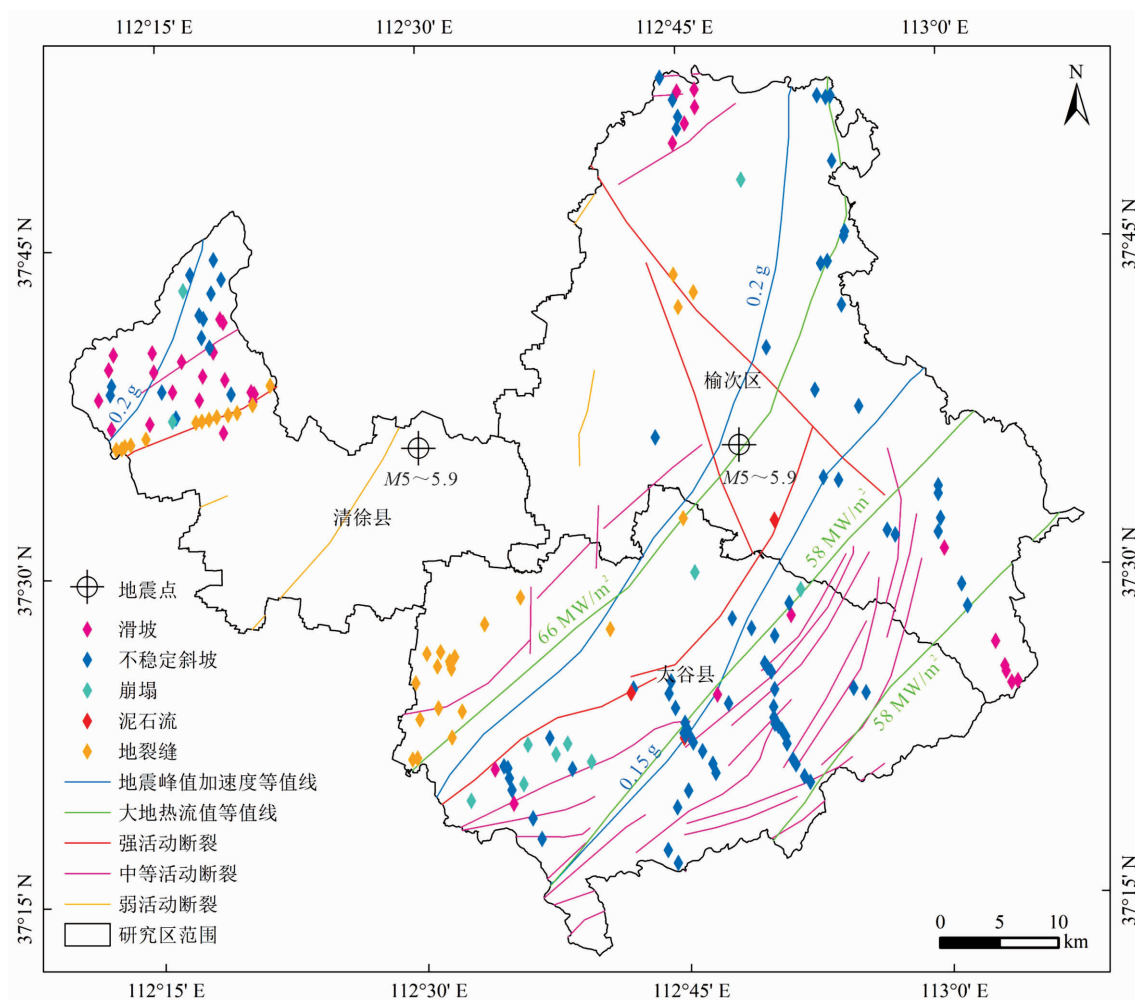


图5 断裂活动性、地震点、地质灾害、地震峰值加速度等值线及大地热流值等值线分布图

Fig. 5 Distribution map of fault activity, earthquake points, geological disaster, seismic peak acceleration contours and geothermal heat flow contours

判别,获得构造岩相学视角下的基于景观单元稳定性的区域地壳稳定性定量评价结果。

### 3 结果与分析

#### 3.1 景观单元空间分布及景观格局构型

各景观单元中,侵蚀性中低山基岩景观区面积最大,为 1353 km<sup>2</sup>;盆山过渡带景观区面积为 465 km<sup>2</sup>;山前倾斜洪积平原区面积为 475 km<sup>2</sup>;汾河冲积平原区面积为 573 km<sup>2</sup>;河流湿地水域区面积最小,为 80 km<sup>2</sup>(图 6)。

各景观单元整体呈对称、镶嵌及渐变格局分布(图 6)。从山地到盆地依次为侵蚀性中低山基岩景观区、盆山过渡带景观区、山间开流盆地景观区,山间开流盆地景观区从盆地边缘到内部依次为山前倾

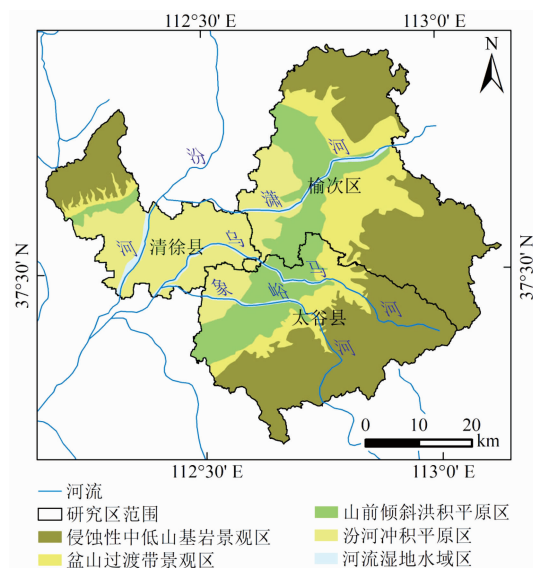


图6 景观单元分布图

Fig. 6 Distribution map of landscape units



斜洪积平原区、汾河冲积平原区, 河流湿地水域区嵌落在山间开流盆地景观区内, 各景观单元以汾河廊道为对称中心, 从山地到盆地内部逐渐镶嵌过渡。

侵蚀性中低山基岩景观区的景观格局构型为森林、草地斑块叠加河流、道路廊道, 廊道呈北西、南北向平行分布, 线密度为 0.13 条/km (图 7); 盆山过渡带景观区的景观格局构型为耕地、草地及城镇斑块叠加河流、道路廊道, 廊道呈北东、北西向平行分布, 线密度为 0.24 条/km (图 7); 山间开流盆地景观区的景观格局构型为城镇、耕地和水域斑块叠加河流、道路廊道, 廊道呈网状交织分布, 线密度为 0.37 条/km (图 7)。

### 3.2 景观区沉积序列特征及演化模式

#### 3.2.1 沉积序列特征

盆山过渡带景观区内的黄楼村三级河流阶地 + 黄土台地 (T1 ~ T3) 剖面整体高 32 m, 走向为 165°, 第三级黄土台地 (T3) 高 6 m, 第二级河流阶地 (T2) 高 15 m, 第一级河流阶地 (T1) 高 11 m, 自上而下岩性分层为 (图 8):

32 ~ 26 m (T3): 淡黄色粉质黏土、亚黏土;

26 ~ 18 m (T2): 土黄色粉砂质黏土;

18 ~ 11 m (T2): 黄棕色砂质黏土夹砂砾石层;

11 ~ 7 m (T1): 褐色砾石层和灰色砂质砾质黏土层互层, 近水平层理发育;

7 ~ 0 m (T1): 黄褐色粉砂质黏土。

该剖面揭示的垂向沉积序列结构为风积相和河流相。

山前倾斜洪积平原区内西凉泉村附近的小河沟深约 5 m, 走向近南北, 小河沟西壁岩性为砂砾石层夹灰褐色薄层砂质黏土层, 局部斜层理产状为  $198^{\circ} \angle 30^{\circ}$ , 砾石产状为  $11^{\circ} \angle 53^{\circ}$ , 东壁岩性为砂砾石层与砾石层互层。位于西梁泉村小河沟南西方向

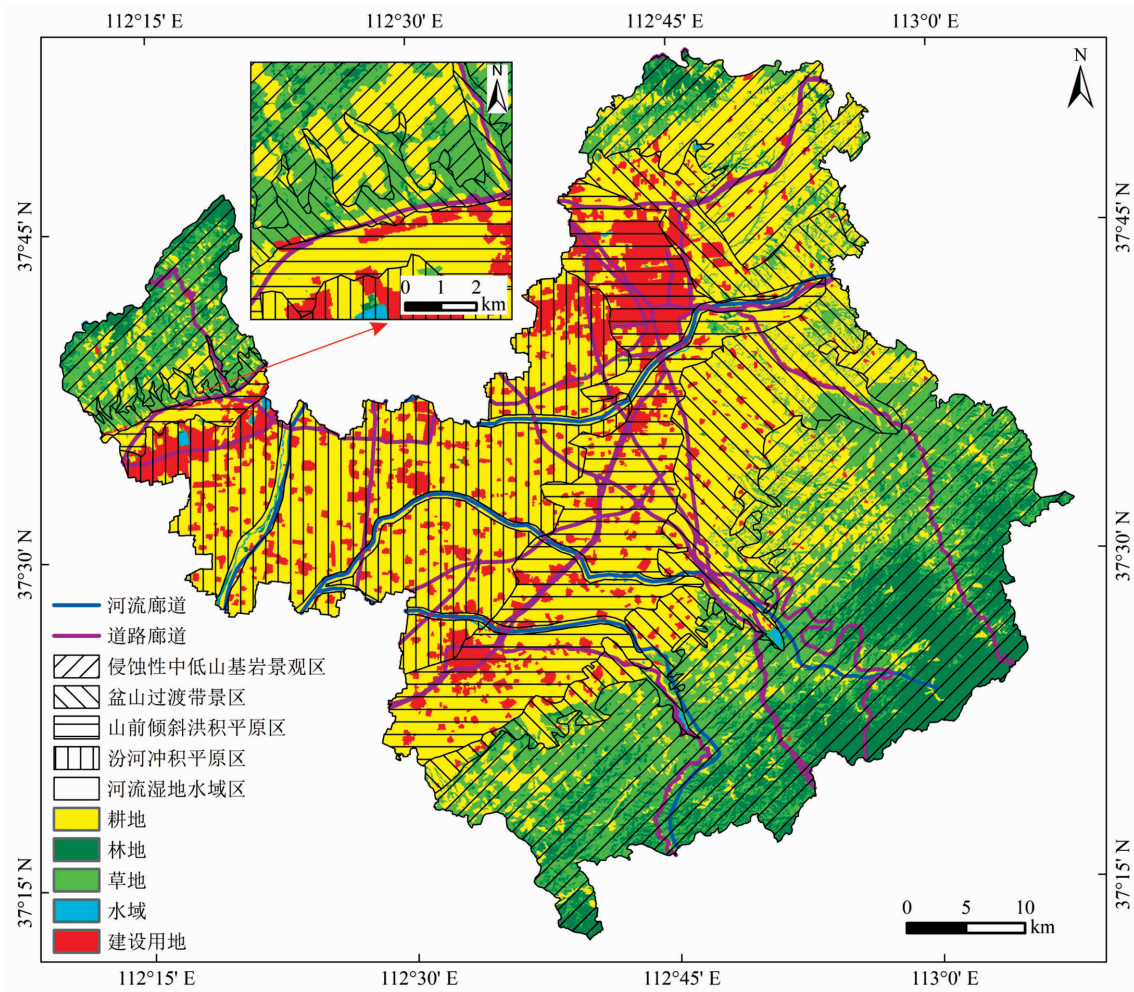


图 7 景观格局构型图

Fig. 7 Layout of landscape pattern

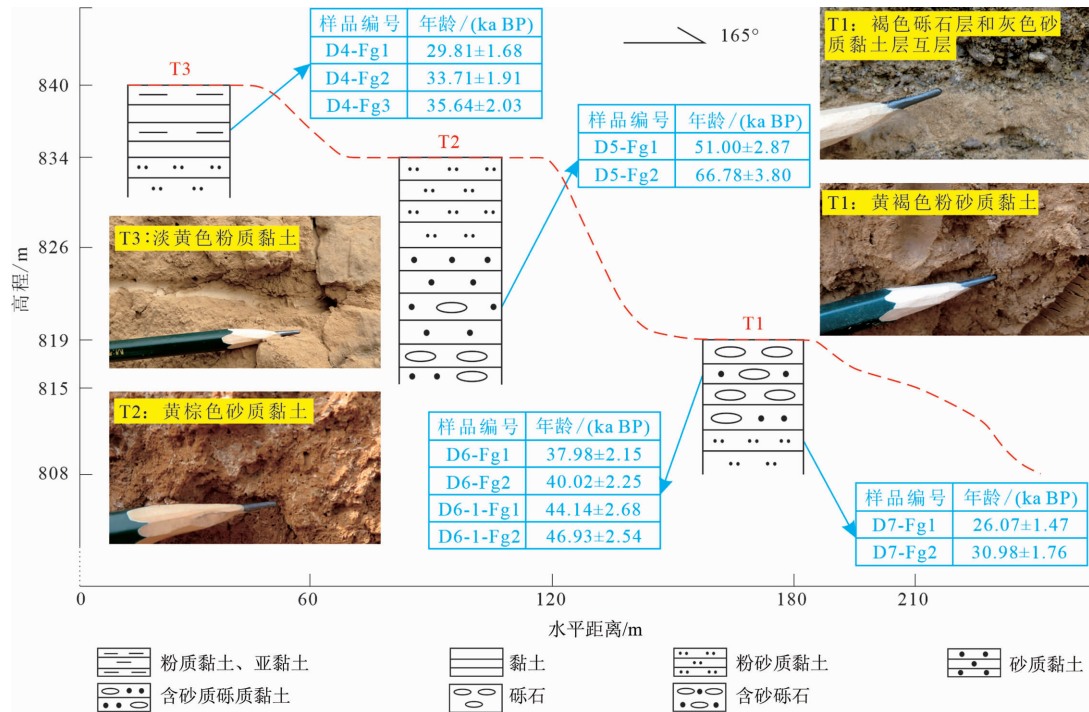


图8 黄楼村三级阶地地质剖面图

Fig. 8 Geological profile of the third-level terrace in Huanglou village, China

250 m 处的陡坎高约 8 m,岩性以砂砾石为主,局部见有黏土物质,局部层理产状为  $5^{\circ} \angle 5^{\circ}$ ,砾石产状为  $20^{\circ} \angle 50^{\circ}$ 。小河沟剖面 and 陡坎剖面揭示的横向沉积序列结构为河流相和冲积扇相,并且小河沟西壁沉积物的层理南倾而砾石北倾现象指示水流自北向南流动。

汾河冲积平原区内刘家堡村附近布设的钻孔编号为 ZK10,坐标  $X = 4\ 165\ 059$ ,  $Y = 635\ 712$  (图 4),标高 753 m,孔深 70.05 m,岩性主要为粉质黏土、粉砂、粉土及含砾粉质黏土,局部见膏盐团斑和波状、斑状炭质成分,共计分层 49 层(图 9),全新统底界定在 24.9 m 处,上更新统未见底(图 9)。ZK10 孔揭示的垂向沉积序列结构为河漫滩相、滨湖相、浅湖相、滨湖相、浅湖相及滨湖相。

### 3.2.2 景观形成年代及演化模式

由于黄楼村剖面揭示的河流相和风积相沉积物中的石英、长石含量较多,刘家堡村 ZK10 孔揭示的湖相沉积物中炭质含量相对较多,因此对黄楼村剖面 and ZK10 孔岩芯分别采取光释光测年样和  $C^{14}$  测年样进行年龄测试(图 8、图 9),采样位置、样品成分及测年结果见表 3。

由上述各地区的沉积序列特征及沉积物年龄可

知,盆山过渡带景观区内黄楼村地区的景观演化过程为:在上更新世中—晚期,盆山过渡带地区地壳向上抬升,在河流下切和侧蚀作用下,第二级河流阶地自 51.00 ka BP  $\pm$  2.87 ka BP 前开始形成,第一级河流阶地自 37.98 ka BP  $\pm$  2.15 ka BP 前开始形成,35.64 ka BP  $\pm$  2.03 ka BP 至 29.81 ka BP  $\pm$  1.68 ka BP 期间(上更新世晚—末期),该地区地壳恢复下降,在地势较高的第二级河流阶地之上沉积了风成黄土(T3)。

山前倾斜洪积平原区内西梁泉村地区的景观演化过程为:在上更新世晚—末期,西梁泉村附近河流发育,河水自北向南流动,而在 28.99 ka BP  $\pm$  0.44 ka BP 前后的一段时间,西梁泉村附近河流一度消失,河漫滩发育。在全新世中期,即 6.65 ka BP  $\pm$  0.08 ka BP 前后,随着盆地断陷下降和山区隆升,在出山口地区形成冲积扇。

汾河冲积平原区内刘家堡村地区的景观演化过程为:在大约 40.00 ka BP 至 6.40 ka BP  $\pm$  0.07 ka BP 期间,干旱湖泊发育,湖水经历了 2 次由浅变深的变化,湖泊规模对应发生了 2 次由小到大的变化。在 6.40 ka BP  $\pm$  0.07 ka BP 后的一段时间,湖水再度变浅,湖泊大规模缩小以致消亡,河流发育,河漫滩

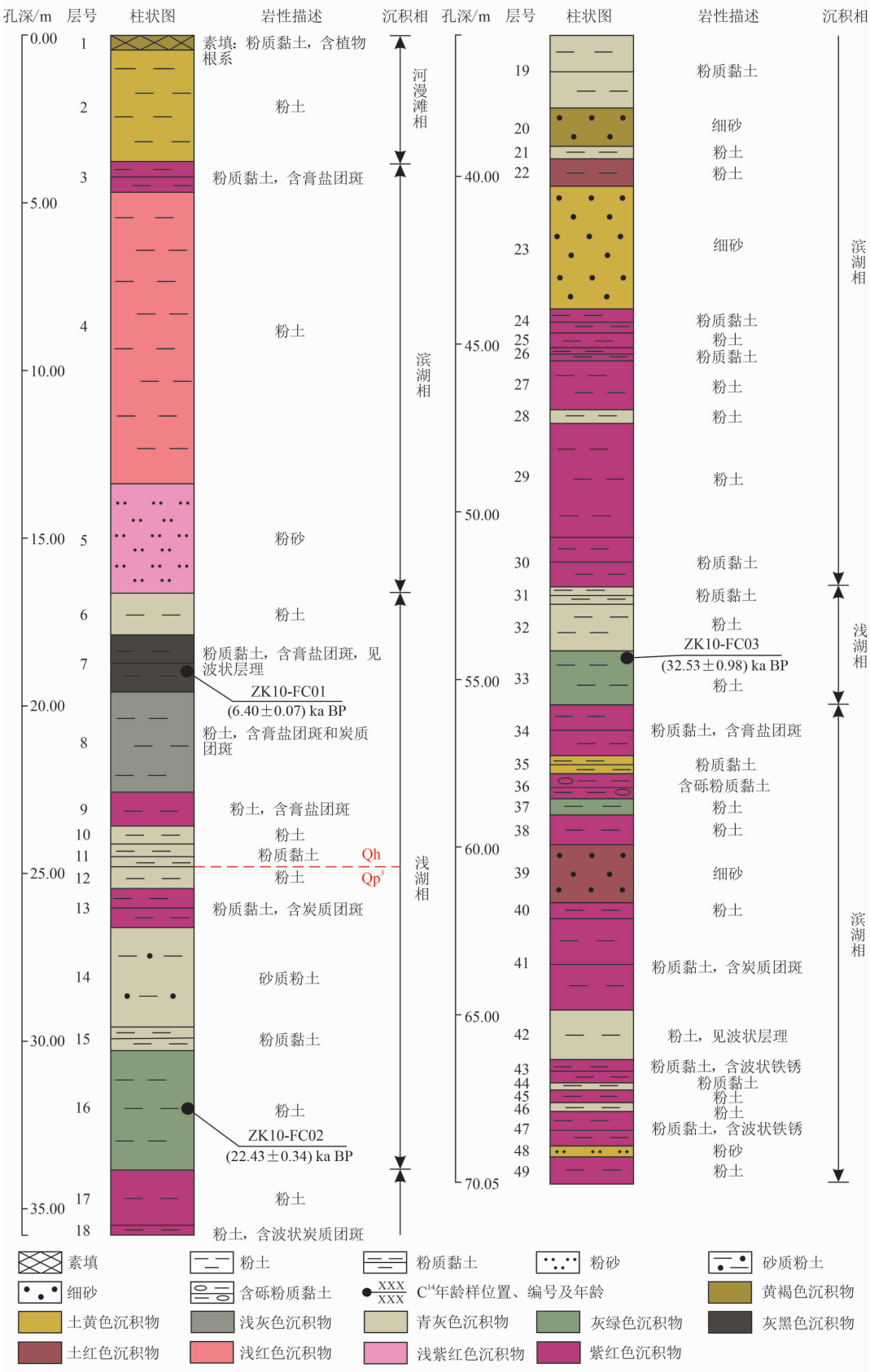


图 9 ZK10 孔钻孔柱状图

Fig. 9 ZK10 hole drilling histogram



广泛分布。

整体而言,研究区盆山镶嵌景观单元体在距今 5 万年以来的景观演化过程为:大约在 50.00 ka BP—35.00 ka BP 期间,盆地处于缓慢抬升阶段,盆山过渡带景观区内河流发育,山间开流盆地景观区内河湖共存(图 10a)。大约在 35.00 ka BP—6.50 ka BP 期间,盆地总体以下降为主,盆山过渡带景观区内形成湖岸山地风成黄土景观,山间开流盆地景观区边缘河流发育,内部整体为湖长河消(图 10b),然而在这期间又经历了 2 次干旱期,导致湖泊规模一度缩减,其中一次干旱发生在 29.00 ka BP 前后,导致山间开流盆地景观区内的河流短暂消失。大约在 6.50 ka BP 至近代期间,气候冷热干湿交替多变,极端降水下在盆山过渡带景观区和山间开流盆地景观区边缘的临近出山口地区形成冲积扇,极端干旱下,盆地内部湖消河长,以致湖泊完全湮灭(图 10c)。

3.3 景观单元稳定性特征

各景观单元内的岩性、高程、坡度、断裂线密度、断裂平均长度、斑块类型、廊道线密度及景观单元形成速度如表 4 所示。各单因素方面景观单元的稳定性分别为:岩性方面,从高到低依次是侵蚀性中低山

基岩景观区、盆山过渡带景观区、山前倾斜洪积平原区、汾河冲积平原区、河流湿地水域区;高程和坡度方面,从高到低依次是汾河冲积平原区、山前倾斜洪积平原区、河流湿地水域区、盆山过渡带景观区、侵蚀性中低山基岩景观区;斑块类型和廊道线密度方面,从高到低依次是侵蚀性中低山基岩景观区、盆山过渡带景观区、河流湿地水域区、汾河冲积平原区、山前倾斜洪积平原区;断裂线密度方面,从高到低依次是汾河冲积平原区、盆山过渡带景观区、河流湿地水域区、侵蚀性中低山基岩景观区、山前倾斜洪积平原区;断裂平均长度方面,从高到低依次是侵蚀性中低山基岩景观区、山间开流盆地景观区、盆山过渡带景观区;景观单元形成速度方面,从高到低依次是侵蚀性中低山基岩景观区、河流湿地水域区、山前倾斜洪积平原区、盆山过渡带景观区、汾河冲积平原区。

分析认为,断裂规模、密度及岩性是影响景观单元稳定性的内部因素,高程、坡度及景观构型是影响景观单元稳定性的外部因素,景观演化速度是影响景观单元稳定性的长期因素,短期难以成效,因此,各因素对于景观稳定性的重要程度从高到低依次为

表 3 样品采样位置、成分及年龄  
Tab. 3 Sampling location, composition and age of samples

取样位置	成分	内容	样品编号	年龄/(ka BP)
黄楼村第三级黄土台地上部	淡黄色粉质黏土	光释光测年	D4 - Fg1	29.81 ± 1.68
黄楼村第三级黄土台中部	淡黄色粉质黏土	光释光测年	D4 - Fg2	33.71 ± 1.91
黄楼村第三级黄土台地下部	淡黄色粉质黏土	光释光测年	D4 - Fg3	35.64 ± 2.03
黄楼村第二级河流阶地上部	含砾黏土	光释光测年	D5 - Fg1	51.00 ± 2.87
黄楼村第二级河流阶地下部	含砾黏土	光释光测年	D5 - Fg2	66.78 ± 3.80
黄楼村第一级河流阶地(西)上部	细砾黏土	光释光测年	D6 - Fg1	37.98 ± 2.15
黄楼村第一级河流阶地(西)中上部	细砾黏土	光释光测年	D6 - Fg2	40.02 ± 2.25
黄楼村第一级河流阶地(西)中下部	细砾黏土	光释光测年	D6 - 1 - Fg1	44.14 ± 2.68
黄楼村第一级河流阶地(西)下部	细砾黏土	光释光测年	D6 - 1 - Fg2	46.93 ± 2.54
黄楼村第一级河流阶地(东)上部	粉砂质黏土	光释光测年	D7 - Fg1	26.07 ± 1.47
黄楼村第一级河流阶地(东)下部	粉砂质黏土	光释光测年	D7 - Fg2	30.98 ± 1.76
刘家园村小河沟西壁	砂质黏土	C <sup>14</sup> 测年	D78 - FC1	28.99 ± 0.44
刘家园村小河沟南西 250 m 处陡坎	黏土	C <sup>14</sup> 测年	D79 - FC1	6.65 ± 0.08
ZK10 孔 19.30 ~ 19.40 m	粉土	C <sup>14</sup> 测年	ZK10 - FC01	6.40 ± 0.07
ZK10 孔 31.80 ~ 32.00 m	粉土	C <sup>14</sup> 测年	ZK10 - FC02	22.43 ± 0.34
ZK10 孔 54.30 ~ 54.40 m	粉土	C <sup>14</sup> 测年	ZK10 - FC03	32.53 ± 0.98

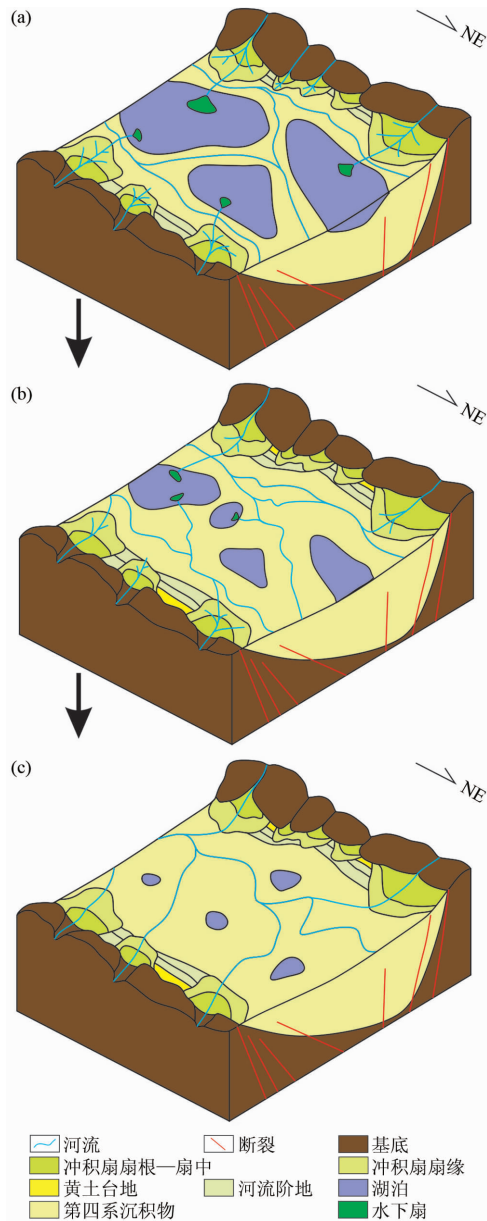


图 10 景观演化图:(a) 50.00 ka BP—35.00 ka BP 期间;  
(b) 35.00 ka BP—6.50 ka BP 期间;(c) 6.50 ka BP—近代期间  
Fig. 10 Landscape evolution map:  
(a) 50.00 ka BP—35.00 ka BP; (b) 35.00 ka BP—6.50 ka BP;  
(c) from 6.50 ka BP to present

岩性、断裂平均长度、断裂线密度、高程和坡度、斑块类型和廊道线密度、景观形成速度,鉴于此,研究区各景观单元稳定性的综合定性分析结果排名从高到低依次为:侵蚀性中低山基岩景观区、汾河冲积平原区、山前倾斜洪积平原区、盆山过渡带景观区、河流湿地水域区。

### 3.4 区域地壳稳定性评价结果

建立的五维一体构造岩相学评价体系如表 5 所

示,依据评价体系得出的定量评价结果为(图 11):研究区面积共 2946 km<sup>2</sup>,其中次稳定区面积最大,为 1323 km<sup>2</sup>,占总面积的 45%;次不稳定区面积最小,为 651 km<sup>2</sup>,占总面积的 22%;不稳定区面积为 972 km<sup>2</sup>,占总面积的 33%。

研究区区域地壳以次稳定为主,次稳定区主要分布在汾河冲积平原区内和南东部侵蚀性中低山基岩景观区的中—南东部(图 11),次稳定区断裂活动性总体相对较弱,断裂规模和线密度总体一般,南东部侵蚀性中低山基岩景观区内的次稳定区虽然地势较高,坡度较大,但是在坚硬的岩土体、较低的地震峰值加速度、较低的大地热流值、林地和草地自然斑块分布的环境条件下,其稳定性相对较高,汾河冲积平原区内,虽然细粒松散沉积物广布,但是高程较低、坡度较缓、地质灾害分布较少,因此稳定性也相对较高。次不稳定区主要分布在西部、北部的侵蚀性中低山基岩景观区内和南东部侵蚀性中低山基岩景观区的北西部(图 11),西部和北部的侵蚀性中低山基岩景观区主要受地震峰值加速度影响,南东部侵蚀性中低山基岩景观区内的次不稳定区主要受断裂活动性及次级断裂密度影响(靠近太谷断裂),导致稳定性较差。不稳定区主要分布在盆山过渡带景观区和山前倾斜洪积平原区内(图 11),该地区虽然岩土体密实度较高,但是控盆活动断裂(交城断裂和太谷断裂)分布其中,断裂的线密度和规模较大、活动性较强,是地表水高下渗区,土体结构不稳定,以地裂缝为主的地质灾害集中分布,地震峰值加速度较高,导致区域地壳不稳定。河流湿地水域区因河岸沼泽发育,河流侵蚀强烈,稳定性整体较差,随着该景观区从汾河冲积平原区到山前倾斜洪积平原区穿越分布,逐渐靠近控盆活动断裂,区域地壳稳定性由次不稳定转变为不稳定。

大西客运专线主要穿过汾河冲积平原区的次稳定地区,该地区稳定性相对较好(图 11),但是在土体方面,分布的粉土、粉质黏土及黏土等细粒物质,在遇水及外力增加时,易发生湿陷性,因此在该铁路运营阶段(2014 年投入运营),需要对铁路沿线的土体严格进行监测,在发生下陷时,及时采取排水、充填及压实等措施补救。潇河产业园区的中—西部(占园区总面积约 2/3)主要为汾河冲积平原内的次稳定区,东部为山前倾斜洪积平原区内的不稳定区(图 11),该园区在扩建和运营

表 4 各景观单元内影响景观单元稳定性的系列因素特征

Tab. 4 The characteristics of a series of factors affecting the stability of the landscape unit in each landscape unit

景观单元类型	岩性	高程/m	坡度/(°)	断裂线密度/ (条/km)	断裂平均 长度/km	斑块类型	廊道线密度/ (条/km)	景观单元形成 速度/(mm/a)
侵蚀性中低山 基岩景观区	以基岩为主	>950	>25	0.34	25	林地和草地斑块	0.13	最慢
盆地过渡带景 观区	以亚砂土及砾石 为主,黏土较少	800~950	10~25	0.15	110	耕地、林地和 城镇斑块	0.24	0.64
山前倾斜洪积平 原区	以亚砂土、粉土、 粉质黏土、黏土 及砾石为主	750~800	<10	0.47	45	耕地和城镇斑块	0.37	0.17
汾河冲积平原区		±750	<10	0.08	45	耕地和城镇斑块	0.20	1.70
河流湿地水域区	以粉土、粉质黏 土及淤泥为主	660~800	<10,局部>25	0.47;0.08	45	水域斑块	0.37;0.20	次慢

表 5 基于景观单元稳定性的区域地壳稳定性评价体系

Tab. 5 Regional crustal stability evaluation system based on the stability of landscape units

稳定级	立体和时间维度评价					平面和物质维度评价							
	断裂 活动性	地震峰值 加速度/ g	地震 震级	景观单元 形成速度/ (mm/a)	大地热 流值/ (MW/m <sup>2</sup> )	岩性	断裂 长度/ km	断裂线 密度/ (条/km)	地质灾害 面密度/ (个/km <sup>2</sup> )	高程/ m	坡度/ (°)	斑块 类型	廊道线 密度/ (条/km)
稳定	基本无 活动性	<0.05	<5	<0.10	<60	A	<15	<0.10	<0.01	<750	<5	I	<0.15
次稳定	弱活 动性	0.05~0.15	5~6	0.10~0.50	60~75	B	15~30	0.10~0.25	0.01~0.05	750~800	5~10	II	0.15~0.25
次不稳定	中等 活动性	0.15~0.40	6~7	0.50~1.00	75~85	C	30~60	0.25~0.40	0.05~0.10	800~950	10~25	III	0.25~0.40
不稳定	较强 活动性	>0.40	>7	>1.00	>85	D	>60	>0.40	>0.10	>950	>25	IV	>0.40
权重	0.47	0.26	0.18	0.06	0.03	0.39	0.24	0.13	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02

注:1. A 代表岩性以基岩为主;B 代表砾石、砂土、粉土混杂,黏土类土较少;C 代表以粉土、黏土类土及细砂为主,砾石较少;D 代表河流两岸粉土、黏土类土和淤泥。

2. I 代表以林地和草地斑块为主;II 代表林地、草地自然斑块和耕地、城镇人工斑块混合;III 代表以耕地和城镇斑块为主;IV 代表以水域斑块为主。

时,在园区中一西部应同样注意细粒土湿陷问题,东部分布不稳定斜坡,岩土体碎裂岩化较强,需要进行地基加固,并且采取削坡、结构网及锚杆护坡的方法提高边坡稳定性。

4 讨论与建议

4.1 景观单元稳定性与区域地壳稳定性关系

区域地壳稳定性与生态景观单元的关系是一个

新兴研究方向,是地球科学为人类生存环境保护和修复提供服务的重要途径。景观单元不稳定主要表现为景观格局遭受破坏,其破坏机制包括自然和人为两个方面。自然破坏机制方面,在地球内、外动力作用下,区域地壳失稳,进而导致不良地质现象发生,对景观格局造成破坏,区域地壳稳定性是景观单元稳定性的决定性因素。人为破坏机制方面,随着城市化进程的加快,以城镇和耕地为主的人工景观逐渐增多,以林地和草地为主的原生自然景观逐渐



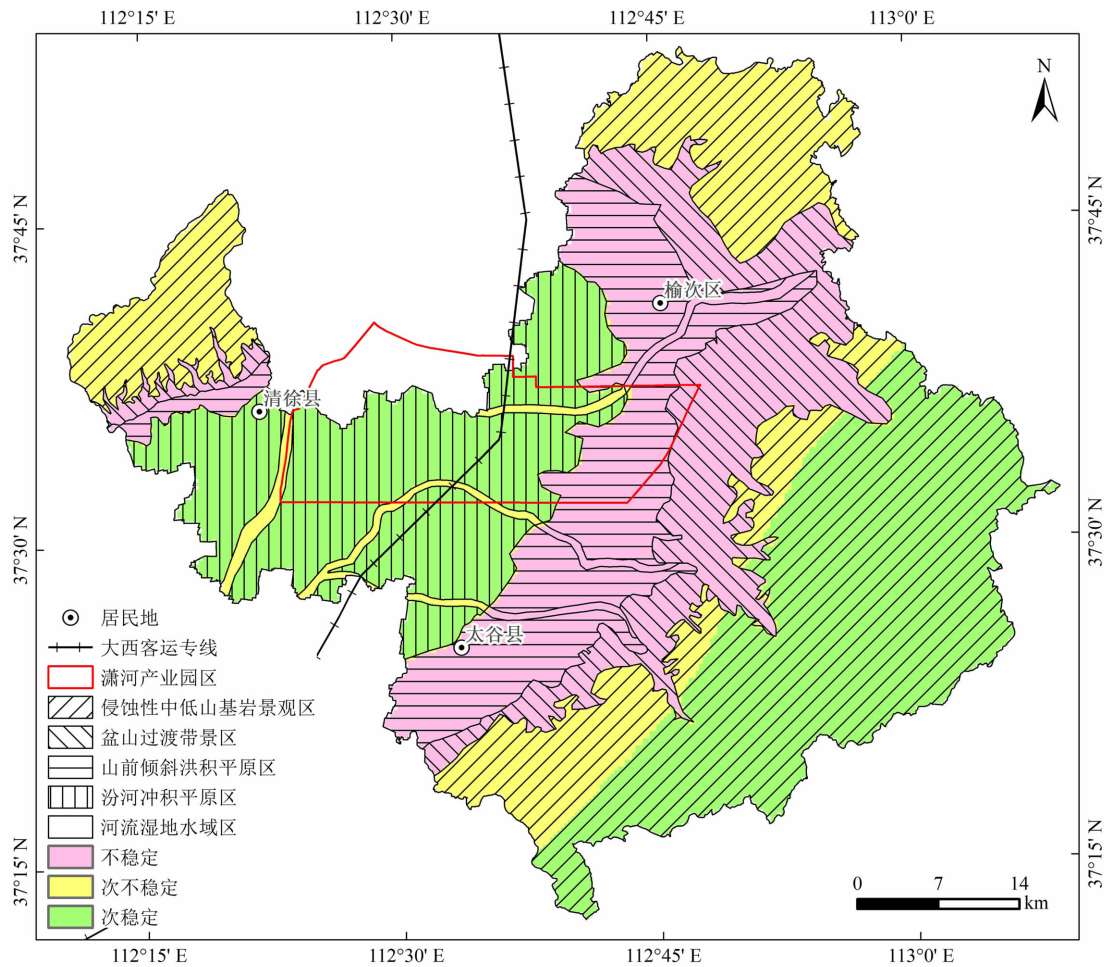


图 11 区域地壳稳定性评价结果图

Fig. 11 Evaluation results of regional crustal stability

减少,加上人类活动(采矿、地下水开采、植被砍伐等)诱发的地质灾害,对景观格局造成破坏,人类活动是影响景观单元稳定性的附加因素。总之,地质灾害(包括自然灾害和人为灾害)是破坏景观格局的主要原因之一,导致景观单元不稳定,并且区域地壳不稳定主要通过地质灾害形式体现,因此,景观单元稳定性一定程度上也是区域地壳不稳定的外在表现。

鉴于上述情况,将区域地壳稳定性定量评价结果与景观单元稳定性定性分析结果耦合(图 11、图 12),从具有单一区域地壳稳定性的汾河冲积平原区、山前倾斜洪积平原区及盆山过渡带景观区分布来看,从汾河冲积平原区到盆山过渡带景观区,随着区域地壳稳定性由次稳定转变为不稳定,景观单元稳定性也随之降低(图 12),再次说明了区域地壳稳定性决定了景观单元稳定性,景观单元稳定性是区

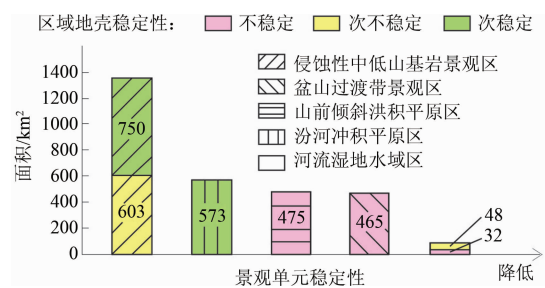


图 12 各景观单元内的景观单元稳定性与区域地壳稳定性分布图

Fig. 12 Distribution of landscape unit stability and regional crustal stability in each landscape unit

域地壳稳定性的外在表现。从具有复合区域地壳稳定性的侵蚀性中低山基岩景观区和河流湿地水域区来看,虽然这两个景观单元中都分布着由构造不稳定为主导所引起的区域地壳相对不稳定区,但河流湿地水域区中以岩土体为主导的表生环境稳定性远

低于侵蚀性中低山基岩景观区,以致河流湿地水域区的景观单元稳定性较侵蚀性中低山基岩景观区明显更低(图12),由此可见在决定景观单元稳定性的区域地壳稳定性中,地表稳定性起直接作用,构造稳定性起间接作用。

在二者关系中,区域地壳稳定性具体通过断裂、地震及地质灾害等对景观单元稳定性造成影响。如在研究区东部地壳不稳定区,由于太谷断裂持续活动蓄力,配合区域上其他构造作用,诱发了公元1303年山西洪洞8级特大地震,震后据史料记载“坏官民庐舍十万计,山摧阜移,村堡移徙,地裂成渠”<sup>[27-28]</sup>,此次地震使原有的生态系统及景观格局遭到破坏,“山摧阜移、地裂成渠”指示震后灾害分布广泛,促使该地区景观稳定性降低。在太谷县地壳次稳定地区,大面积分布耕地斑块,超强度的农业灌溉导致地下水超采,进而在当地诱发一系列的地面沉降和地裂缝,使景观单元稳定性向不稳定发展。在清徐县地壳不稳定区,斑块类型主要为城镇斑块,公路廊道沿山前断裂带分布,人类工程活动产生大量人工边坡,加之该地区高差大、坡度陡、岩土破碎,导致滑坡、地裂缝等地质灾害频发,促进了景观单元的不稳定。

#### 4.2 综合建议

针对晋中盆地北部景观格局优化及工程场址选择这一问题,利用本文基于景观单元稳定性的区域地壳稳定性评价结果,提出下列建议:

(1)生态安全:林地斑块、草地斑块和水域斑块具有良好的生态景观保护、水土保持和生态景观修复作用,可在侵蚀性中低山基岩景观区内培育生态林地,该地区地高坡陡,一定程度能减轻人为干扰对生态林地的影响。在河流湿地水域区建设湿地生态公园,对于缓减城市“热岛效应”具有积极意义。从生态地质学角度看,活动断裂带岩土体松散,并且含水率高,有利于植物生长,在活动性断裂带范围内,加大深根系乔木类植被恢复,往往形成良好的人工重建生态景观单元和绿色生态修复廊道,从而提高景观稳定性。充分利用盆山过渡带景观区岩土体松散、易透水性和地下水较高等生态地质条件,以乔木类植被恢复和修复立体绿色生态环境,将有效的促进区域地壳稳定性向增强方向发展。

(2)工程选址:晋中盆地内的汾河冲积平原区为区域地壳次稳定区,同时景观单元稳定性相对较

高,适宜作为太原—晋中城市群扩建的工程场址。侵蚀性中低山基岩景观区为区域地壳次稳定和次不稳定区,同时景观单元稳定性较高,在西部和北部的侵蚀性中低山基岩景观区内,建筑物需要提高工程安全等级,在南东部的侵蚀性中低山基岩景观区内,适宜发展建设休闲山庄、度假村及别墅区等。盆山过渡带地区 and 山前倾斜洪积平原区为区域地壳不稳定区,同时景观单元稳定性为中等—较差,该地区不适宜进行工程建设,经调查发现该地区的居民房屋受地裂缝破坏严重,因此建议对已有建筑在提高安全等级的基础上,必要时进行搬迁避让。

(3)资源经济:太谷县地区地热资源丰富,然而该地区区域地壳不稳定,景观单元稳定性也一般,主要原因是临近活动断裂,且地下水超采诱发的地裂缝和地面沉降分布较多,因此建议在该地区可尝试采用注浆或人工夯实等措施进行地裂缝和地面沉降灾害防治,并且加强活动断裂监测,经治理后,充分利用地热资源发展温泉旅游行业,可为当地带来巨大的经济效益,同时提高居民的幸福指数。

## 5 结论

本文通过构造岩相学五维一体研究方法,对晋中盆地北部进行了景观单元划分与景观演化分析,在此基础上,进一步展开景观单元稳定性定性评估与区域地壳稳定性定量评价,主要结论如下:

(1)景观单元从山地到盆地依次为:侵蚀性中低山基岩景观区、盆山过渡带景观区、山前倾斜洪积平原区、汾河冲积平原区、河流湿地水域区,整体以汾河廊道为对称中心对称镶嵌分布。

(2)50 ka BP—35 ka BP 期间,盆地整体抬升,盆地内部河湖共存;35 ka BP—6.5 ka BP 期间,盆地恢复断陷下降,盆地内部湖长河消,湖岸山地风成黄土堆积;6.5 ka BP 以来,盆地内湖消河长,以致湖泊消失。

(3)晋中盆地北部景观单元稳定性在侵蚀性中低山基岩景观区较高,在盆山过渡带景观区及河流湿地水域区较低,在汾河冲积平原区和山前倾斜洪积平原区中等。

(4)晋中盆地北部区域地壳次稳定区面积最大,分布在汾河冲积平原区及南东部侵蚀性中低山基岩景观区内,区域地壳不稳定区面积次之,集中在

盆山过渡带景观区和山前倾斜洪积平原区内。

(5) 充分利用各景观单元的生态地质条件进行生态斑块和廊道重建可有效提高景观单元稳定性及区域地壳稳定性。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴树仁, 韩金良, 石菊松, 等. 区域地壳稳定性研究现状和发展趋势[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(z1): 26–30. [WU Shuren, HAN Jinliang, SHI Jusong, et al. Progress and develop trend of the study on regional crustal stability in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(z1): 26–30] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2004.z1.006
- [2] 中国地质调查局. 活动断裂与区域地壳稳定性调查评价规范(1:50000、1:250000): DD2015-02 [S]. 2015. [China Geological Survey. Standard for investigation and evaluation of active faults and regional crustal stability (1:50000, 1:250000): DD2015-02 [S]. 2015]
- [3] 胡海涛, 殷跃平. 区域地壳稳定性评价“安全岛”理论及方法[J]. 地学前缘, 1996, **3**(1-2): 57–68. [HU Haitao, YIN Yueping. Theory and evaluation methods of regional crust stability “Safety Island” [J]. Earth Science Frontiers, 1996, **3**(1-2): 57–68]
- [4] 郑超绘. 庐断断裂带安徽段区域地壳稳定性评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 1–5. [ZHENG Chaohui. Evaluation of crustal stability in the Anhui section of the Tanlu fault zone [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 1–5]
- [5] 杨立鹏. 白龙江引水工程区域地壳稳定性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1–7. [YANG Lipeng. Regional crustal stability assessment of Bailongjiang water diversion project [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1–7]
- [6] 刘继文. CEPC 选址区综合地质评价[D]. 吉林: 吉林大学, 2020: 1–8. [LIU Jiwen. Comprehensive geological evaluation of CEPC site selection area [D]. Jilin: Jilin University, 2020: 1–8]
- [7] 张树轩, 杨为民, 孟华君, 等. 京张地区区域地壳稳定性评价[J]. 地质力学学报, 2018, **24**(1): 70–77. [ZHANG Shuxuan, YANG Weimin, MENG Huajun, et al. Regional crustal stability evaluation in Beijing-Zhangjiakou area [J]. Journal of Geomechanics, 2018, **24**(1): 70–77] DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2018.24.01.008
- [8] ROHINA A, AHMADI H, MOEINI A, et al. Site selection for constructing groundwater dams through Boolean logic and AHP method (case study: Watershed of Imamzadeh Jafar Gachsaran) [J]. Paddy and Water Environment, 2019, **18**(2): 59–72. DOI: 10.1007/s10333-019-00764-9
- [9] NOORI A M, PRADHAN B, AJAJ Q M. Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS [J]. Journal of Hydrology, 2019, **574**: 964–979. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.001
- [10] 姚鑫, 张路青, 李凌婧, 等. 工程场址区域地壳稳定性 InSAR 评价研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(1): 104–115. [YAO Xin, ZHANG Luqing, LI Lingjing, et al. InSAR observing the regional crustal stability of engineering sites [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(1): 104–115] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-153
- [11] ABDULLAHI S, MAHMUD A R B, PRADHAN B. Spatial modelling of site suitability assessment for hospitals using geographical information system-based multicriteria approach at Qazvin city, Iran [J]. Geocarto International, 2014, **29**(2): 164–184. DOI: 10.1080/10106049.2012.752531
- [12] AL-ADAMAT R, DIABAT A, SHATNAWI G. Combining GIS with multicriteria decision making for siting water harvesting ponds in northern Jordan [J]. Journal of Arid Environments, 2010, **74**(11): 1471–1477. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2010.07.001
- [13] MEI Sai, CHU Hongxian, DONG Lingyu, et al. Influencing factors and evaluation application of regional crustal stability in the Bohai Strait [J]. China Geology, 2019, **2**(3): 354–363. DOI: 10.31035/eg2018075
- [14] 朱大奎, 王颖, 陈方. 环境地质学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 178–206. [ZHU Dakui, WANG Ying, CHEN Fang. Environmental geology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 178–206]
- [15] 刘祥龙, 张文君, 陈朝亮, 等. 内江市景观格局对地质灾害易发性的影响分析[J]. 测绘科学, 2021, **46**(5): 118–125. [LIU Xianglong, ZHANG Wenjun, CHEN Chaoliang, et al. Analysis of the influence of landscape pattern on geological disaster susceptibility [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, **46**(5): 118–125] DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.05.017
- [16] 王权, 李阳兵. 岩溶槽谷区地形起伏特征及其对景观格局的影响[J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 702–716. [WANG Quan, LI Yangbing. The characteristics of topographic relief and its influence on landscape pattern in karst trough valley area [J]. Mountain Research, 2019, **37**(5): 702–716] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000461
- [17] 范贺娟, 来风兵, 曹家睿, 等. 天山野果林区滑坡景观时空演变及生态风险预测[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 231–240. [FAN Hejuan, LAI Fengbing, CAO Jiarui, et al. Spatio-temporal evolution and ecological risk prediction of landslide landscape in the Tianshan wild fruit forest area [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2): 231–240] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000505
- [18] 陈志. 滇西北高原峡谷生态脆弱区地质灾害研究——以香格里拉市为例[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 16–48. [CHEN Zhi. Study on geo-hazards in the eco-fragile region of plateau gorge in northwest Yunnan: A case study of Shangri La city [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 16–48]
- [19] 孟令超, 彭建兵, 卢全中, 等. 山西太原盆地裂缝群发机制与



- 深部构造关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, **30**(1): 76–85. [MENG Lingchao, PENG Jianbing, LU Quanzhong, et al. Relationship between mechanism of ground fissure group and deep tectonic structures in Taiyuan Basin, Shanxi province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, **30**(1): 76–85] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003–8035.2019.01.09
- [20] 张龙飞, 董斌, 史双双, 等. 太原盆地田庄断裂活动性分段及地震危险性分析研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, **40**(2): 204–213. [ZHANG Longfei, DONG Bin, SHI Shuangshuang, et al. Segmentation and seismic risk analysis of Tianzhuang fault in Taiyuan Basin [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, **40**(2): 204–213] DOI: 10.14075/j.jgg.2020.02.018
- [21] 王雨, 李自红, 宁杰远. 山西断陷带的地震分布及地壳地震波速度结构[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, **56**(2): 283–290. [WANG Yu, LI Zihong, NING Jieyuan. Spatial distribution of earthquakes and crustal seismic velocity in Shanxi rift zone [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, **56**(2): 283–290] DOI: 10.13209/j.0479–8023.2020.001
- [22] 张洁. 清徐县李家楼滑坡阻滑翘起段抗滑效应分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, **31**(4): 11–14. [ZHANG Jie. Analysis of anti-slip effect of Lijialou landslide blocking and upturning section in Qingxu county [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, **31**(4): 11–14]
- [23] 方维萱, 杜玉龙, 李建旭, 等. 大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1–39. [FANG Weixuan, DU Yulong, LI Jianxu, et al. Large-scale mapping of tectonic lithofacies and ore-predication [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 1–39]
- [24] 杜玉龙, 方维萱. 综合构造岩相学勘查技术在玻利维亚古布利达铜矿床找矿中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2021, **43**(5): 800–813. [DU Yulong, FANG Weixuan. Application of comprehensive tectonic lithofacies exploration method in Cuprita Copper Deposit, Bolivia [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, **43**(5): 800–813] DOI: 10.19814/j.jese.2020.11030
- [25] 秦帮策, 方维萱, 张建国, 等. 汾河裂谷晋中盆地内第四纪沉积序列与沉积环境恢复[J]. 地质力学学报, 2021, **27**(6): 1035–1050. [QIN Bangce, FANG Weixuan, ZHANG Jianguo, et al. Quaternary sedimentary sequence and sedimentary environment restoration in the Jinzhong Basin, Fenhe Rift Valley [J]. Journal of Geomechanics, 2021, **27**(6): 1035–1050] DOI: 10.12090/j.j.issn.1006–6616.2021.27.06.084
- [26] 杨瑞雪. 细粒含量对银川细砂力学性能的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021: 8–38. [YANG Ruixue. Effect of fine particle content on mechanical property of Yinchuan fine sand [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021: 8–38]
- [27] 郭瑾. 临汾市城区主要断裂活动性及地震危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 1–8. [GUO Jin. Earthquake risk assessment on main active faults of Linfen city [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 1–8]
- [28] 徐岳仁, 何宏林, 李文巧, 等. 1303年洪洞地震宏观震中修订的新证据[J]. 地震地质, 2018, **40**(5): 945–966. [XU Yueren, HE Honglin, LI Wenqiao, et al. New evidences for amendment of macro-epicenter location of 1303AD Hongtong earthquake [J]. Seismology and Geology, 2018, **40**(5): 945–966] DOI: 10.3969/j.issn.0253–4967.2018.05.001

## Crustal Stability in Northern Jinzhong Basin of China Based on the Stability of Landscape Units

QIN Bangce<sup>1,2</sup>, FANG Weixuan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jianguo<sup>1</sup>, JIA Runxin<sup>1,2</sup>, XIAO Wenjin<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;

2. Innovation Laboratory of Mine, Environment and Mineral, China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The northern part of the Jinzhong Basin, located at Shanxi province of China, is a typical area of urban agglomeration expansion. Research on the stability of landscape units and regional crustal stability is a prerequisite for urban agglomeration and landscape planning in this area. Although the issues of local site safety relevant to geological disasters such as active faults and ground fissures had been addressed by professionals, there was yet a lack of quantitative evaluation from broader perspective of combination of overall landscape unit stability with regional crustal stability. In this study, landscape units and landscape chronology in northern Jinzhong Basin was

divided by the five-dimensional method of tectonic lithofacies. The stability of landscape units was analyzed based on landscape characteristics and evolution, and regional crustal stability was quantitatively evaluated from the perspective of tectonic lithofacies. The following conclusions can be drawn from the results: (1) The landscape units from the mountain to the interior of the basin were formed in an order as, successively, the erosive middle-low mountain bedrock landscape area, the basin-mountain transition zone landscape area, the piedmont slope alluvial plain area, the Fenhe alluvial plain area, and the river wetland water area. (2) Among them, the erosive mid-low mountain bedrock landscape area had higher stability whereas the basin-mountain transition zone and the river wetland water area were low stable. (3) The area with relative crustal stability in the region accounted for 45% of the total area, mainly distributed in the Fenhe alluvial plain area and the erosive mid-low mountain bedrock landscape area in the southeast; the area with relative crustal instability accounted for 33%, mainly in the basin-mountain transition zone landscape area and the piedmont sloped alluvial plain area. (4) Regional crust stability controlled landscape unit stability, which, in turn, was one of the external manifestations of regional crustal stability. The research results provide a scientific reference for site selection, landscape pattern optimization, and regional disaster reduction and prevention in the northern Jinzhong Basin.

**Key words:** regional crustal stability; tectonic lithofacies; five-dimensional method; landscape unit stability; northern Jinzhong Basin