

基于指标体系的董志塬沟谷侵蚀发育特征空间分异研究

滕尊莉

陇东学院

DOI:10.32629/eep.v9i3.3136

[摘要] 以董志塬为研究对象,构建含地形、土壤、降雨、植被、土地利用、工程干扰6个一级指标、14个二级指标的侵蚀评价体系,划分为塬心区、塬边区、沟头带,采用层次分析法与综合指数模型量化侵蚀强度。结果表明:侵蚀强度沟头带(0.78) > 塬边区(0.52) > 塬心区(0.21),沟头跌水高度、坡度为主导因子。研究可为固沟保塬工程布局提供依据。

[关键词] 董志塬; 沟谷侵蚀; 指标体系; 空间分异; 固沟保塬

中图分类号: TQ533.5 **文献标识码:** A

Study on Spatial Differentiation of Gully Erosion Development Characteristics in Dongzhi Plateau Based on Indicator System

Zunli Teng

Longdong University

[Abstract] Taking Dongzhi Plateau as the research object, an erosion evaluation system including 6 first-level indicators (topography, soil, rainfall, vegetation, land use and engineering disturbance) and 14 second-level indicators was constructed. The study area was divided into the central plateau area, the plateau edge area and the gully head zone. The analytic hierarchy process (AHP) and comprehensive index model were adopted to quantify the erosion intensity. The results show that the erosion intensity is in the order of gully head zone (0.78) > plateau edge area (0.52) > central plateau area (0.21), and the gully head drop height and slope gradient are the dominant factors. This study can provide a basis for the layout of the gully and plateau consolidation project.

[Key words] Dongzhi Plateau; gully erosion; indicator system; spatial differentiation; gully and plateau consolidation

1 引言

黄土高原是我国乃至世界上水土流失最严重的地区之一,董志塬作为黄土高原第一大塬,素有“天下黄土第一塬”之称,是甘肃省庆阳市农业、人口和基础设施的主要承载区。近几十年来,为遏制塬面萎缩,国家持续推进“固沟保塬”重点工程^[1]。然而工程布局与措施选择需以沟谷侵蚀发育的空间分异规律为支撑,才能实现精准施策、提高投入效益。当前研究多聚焦单因子机理或小尺度模拟试验,对区域尺度自然与人为因素耦合作用下的空间分异识别仍显不足。因此,构建科学可行的指标体系并量化董志塬沟谷侵蚀发育的空间差异,对丰富黄土塬区侵蚀理论、指导差异化治理均具有重要意义。

在沟谷侵蚀因子识别方面,地形、水动力与土地利用等单因子研究较为成熟^[2];在综合评价方面,指标体系法与层次分析法在区域水土流失评估中应用广泛^[3,4];在空间分异研究方面,GIS技术与分区对比方法提供了有效手段^[5]。然而,已有研究在董志塬尺度下将自然因素与人为因素耦合的综合指标体系尚未系统

建立,分区主导因子的差异化特征亦有待进一步揭示。

本文以董志塬为研究对象,按照“分区—建指标—赋权—评价—揭示分异—治理建议”的思路开展研究,以期为区域固沟保塬工程布局提供理论依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

董志塬位于甘肃省庆阳市西峰区,地理坐标为107° 27′ —107° 52′ E、35° 25′ —35° 51′ N,塬面主体面积约910 km²,是黄土高原保存最完整的塬地。区域地貌以平坦塬面为核心,四周被沟壑密集切割,形成典型的“塬—梁—沟”地貌格局。气候属温带大陆性气候,年均气温约9℃,年均降水量480—550mm,70%以上集中于6—9月,雨热同季且多以短历时强降雨形式出现,为沟谷侵蚀提供了主要动力。区域表层土壤以马兰黄土为主,垂直节理发育、湿陷性强、抗蚀性差。

土地利用方面,塬面以农田与村庄为主,沟坡则为撂荒或稀疏林草地(如图1)。受长期耕作、道路切割与地下水位下降等因

素影响,沟头年均后退速率普遍在0.5—2.5 m区间^[6],局部雨季可达数米,塬面损失形势严峻。



图1 研究区实景图

2.2 数据来源

研究所需数据涵盖基础地理信息、遥感影像、土壤属性、降雨序列及野外实测数据等五类。数字高程模型选用12.5 m精度的ALOS PALSAR数据用于坡度、起伏度提取;遥感影像采用Sentinel-2 2024年数据提取NDVI与土地利用信息;土壤属性来自HWSO v2.0数据库;降雨序列源自庆阳国家基准气象站2021—2023年逐日观测;野外数据由课题组于2024年实地调查获得,内容包括沟头高度、切沟密度与治理措施状态等。

3 研究方法

3.1 分区方案

结合董志塬地貌结构与沟谷侵蚀活跃性特征,以距塬缘距离与地形坡度为双重判据,将研究区划分为三个分析单元:塬心区,距塬缘大于500 m,地形平坦(坡度<3°),以耕作面蚀为主;塬边区,距塬缘100—500 m,为塬面向沟坡过渡的缓冲带(坡度3°—15°),径流汇集明显;沟头带,距塬缘小于100 m,沟头活跃、跌水发育(坡度>15°),为溯源侵蚀最强烈区域。该分区方案兼顾地形分异与治理需求,便于后续指标值的空间提取与比较分析。

3.2 指标体系构建

遵循科学性、代表性、可获取性与区域适宜性原则,本文构建三层评价体系:目标层A为沟谷侵蚀发育综合指数;准则层B由自然因素B1(地形、土壤、降雨、植被)与人为因素B2(土地利用、工程干扰)两类构成;指标层C共14项,沟头跌水高度(C3)是本文针对塬区沟头溯源侵蚀特征专门引入的水动力代理指标,与课题组模拟降雨+放水冲刷试验结论相印证。植被覆盖度、土壤抗蚀性、排水工程完整度等为负向指标,其余为正向指标。

为统一量纲,采用极值标准化法对各指标进行无量纲化处理:正向指标 $X_{ij} = (x_{ij} - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$,负向指标 $X_{ij} = (x_{max} - x_{ij}) / (x_{max} - x_{min})$,标准化后指标值均落入[0, 1]区间。

3.3 权重确定与综合评价

采用层次分析法(AHP)确定各层次指标权重。基于专家咨询结果构造两两判断矩阵,计算最大特征值 λ_{max} 及一致性比率CR,各层CR均小于0.1,满足一致性要求。综合评价采用加权线性模型:

$$E_i = \sum_{j=1}^n W_j \times X_{ij} \quad (1)$$

式中 E_i 为第*i*单元的沟谷侵蚀发育综合指数, W_j 为第*j*项指标权重, X_{ij} 为第*i*单元第*j*项指标的标准化值, $n=14$ 。参照已有研究,将*E*值划分为三级:轻度发育($E < 0.3$)、中度发育($0.3 \leq E < 0.6$)、重度发育($E \geq 0.6$)。

4 结果与分析

4.1 指标权重分析

基于AHP法计算所得的各指标权重见表1。从准则层看,自然因素权重为0.62,显著高于人为因素的0.38,表明在塬区尺度上,地形与水动力条件仍是沟谷侵蚀发育的基础驱动力;人为因素则主要起加速或抑制作用。

从指标层看,权重排序前五位依次为:沟头跌水高度(0.142)、坡度(0.128)、降雨侵蚀力*R*值(0.109)、切沟密度(0.088)与固沟措施覆盖率(0.080)。其中沟头跌水高度位居第一,充分说明塬区沟头的临空高差是控制溯源侵蚀强度的关键地形参数;降雨侵蚀力*R*值的高权重则反映了短历时强降雨在区域侵蚀过程中的主导作用,与已有黄土坡面研究结论一致^[7]。

表1 董志塬沟谷侵蚀发育评价指标体系及权重表

目标层	准则层(权重)	指标层	指标含义	属性	权重
沟谷侵蚀发育综合指数	自然因素(0.62)	坡度 C1	地表倾角	+	0.128
		地形起伏度 C2	高程差	+	0.072
		沟头跌水高度 C3	沟头临空高差	+	0.142
		土壤黏粒含量 C4	<0.002 mm 黏粒占比	-	0.045
		抗蚀性指数 C5	水稳性团聚体占比	-	0.051
		年均降雨量 C6	多年平均值	+	0.038
		降雨侵蚀力 C7	<i>R</i> 值	+	0.109
	人为因素(0.38)	植被覆盖度 C8	NDVI 均值	-	0.035
		耕地率 C9	耕地面积占比	+	0.068
		建设用地率 C10	建成区占比	+	0.042
		道路密度 C11	单位面积路长	+	0.053
		排水工程完整度 C12	设施完好率	-	0.049
		固沟措施覆盖率 C13	已治理沟头比例	-	0.080
		切沟密度 C14	单位面积沟长	+	0.088

4.2 空间分异特征

4.2.1 塬心区

塬心区综合指数*E*介于0.18—0.24,属轻度发育。由于地形平坦、植被与排水设施相对完整,区内以面蚀与细沟侵蚀为主,侵蚀强度低。然而耕作扰动、地膜残留与机械碾压导致局部表层结皮,若遇强降雨仍可能形成小规模径流集中点,需警惕细沟向浅沟发育的潜在趋势。

4.2.2 塬边区

塬边区E介于0.45—0.58,属中度发育,是侵蚀强度陡增的关键过渡带。塬边坡度普遍增大至 3° — 15° ,径流在此集中汇集,浅沟与切沟出现频率明显上升。野外调查表明,道路边沟、房前屋后排水口及地头集中排放口是典型的侵蚀触发节点,人工干扰在此区域的作用被显著放大。

4.2.3 沟头带

沟头带E介于0.72—0.85,属重度发育,是侵蚀最活跃区域。区内沟头跌水高度普遍大于3 m,部分达到6—8 m,跌水能量集中、水动力强烈。该结果与课题组前期模拟降雨加放水冲刷试验所得规律一致,即坡度越大、跌水越高,溯源侵蚀速率越快。

5 讨论

5.1 与已有研究的对比

已有陕北、晋西黄土区的指标体系研究多以坡度、沟壑密度、植被覆盖度为核心指标。本文在借鉴其框架基础上,针对董志塬沟头溯源侵蚀活跃的区域特征,引入沟头跌水高度作为水动力代理指标,使评价结果更贴合塬区实际。综合指数的分区结果与课题组“模拟降雨+放水冲刷”试验所得规律相互印证,表明指标体系具有较好的合理性^[8]。

5.2 治理启示

基于主控因子的分区差异,建议采取差异化治理策略:塬心区以规范化耕作、地膜回收与排水系统维护为主,控制细沟发育;塬边区应在汇流节点设置截排水设施,结合植被缓冲带削减汇流能量;沟头带则需重点布设抗冲蚀固化剂等工程护坡措施,辅以跌水消能构筑物与生态护坡相结合的综合治理方案,遏制沟头溯源。

5.3 研究不足

本研究指标赋权以AHP主观赋权为主,未来可结合熵权法等客观赋权进行交叉验证;受数据时序限制,尚未开展侵蚀演化的动态分析,后续可结合多期遥感与无人机观测进行时空动态评价。

6 结论

(1)构建了包含2个准则层、6个一级指标、14个二级指标的董志塬沟谷侵蚀发育评价体系,自然与人为因素权重比约为62:38,沟头跌水高度与坡度为权重最高的两项指标。(2)董志塬

沟谷侵蚀发育存在显著空间分异:沟头带($E=0.78$)>塬边区($E=0.52$)>塬心区($E=0.21$),总体呈“由塬心向塬缘递增”的格局。(3)主控因子存在明显分区差异:沟头带以沟头跌水高度、坡度等自然因子主导,塬心区则以土地利用与耕作活动等人为因子主导,塬边区为自然—人为因素叠加区。(4)建议按“塬心管控、塬边截流、沟头固护”的思路实施分区差异化治理,为董志塬固沟保塬工程科学布局提供决策参考。

[基金项目]

2023年庆阳市科技计划项目:董志塬沟头侵蚀形态演化机理及抗侵蚀工程措施试验研究,编号:QY-STK-2023A-031; 2022年庆阳市科技计划项目:董志塬固沟保塬工程高填方施工质量控制及安全风险监管的研究,编号:QY-STK-2022B-119; 2024年庆阳市科技计划项目:董志塬区大厚度填土的工程性质研究QY-STK-2024A-064。

[参考文献]

- [1]金钊,彭建兵,庄琦,等.黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性[J].中国科学:地球科学,2023,53(4):806-822.
- [2]郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59,116.
- [3]秦伟,朱清科,张岩.基于GIS和RUSLE的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J].农业工程学报,2009,25(8):157-163.
- [4]张岩,刘宪春,李智广,等.利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况[J].农业工程学报,2012,28(10):165-171.
- [5]杨思齐,金钊,罗达,等.城市扩张对董志塬沟道侵蚀演化的影响[J].第四纪研究,2020,40(5):1359-1370.
- [6]张卜平,朱兴华.董志塬区固沟保塬工程水土侵蚀病害现状及科学挑战[J].水文地质工程地质,2024,51(5):182-194.
- [7]张座雄,刘兴荣,王之君,等.降雨冲刷下黄土堆填边坡土水参数变化规律[J].农业工程学报,2023,39(23):75-84.
- [8]杨思齐,金钊,余云龙.1975—2015年董志塬土地利用/覆被变化及人类活动影响[J].第四纪研究,2019,39(6):1433-1442.

作者简介:

滕尊莉(1987--),女,汉族,甘肃省白银市人,硕士研究生,陇东学院,讲师,结构工程。