

黄土丘陵第三副区典型淤地坝系结构特征分析

宇涛^{1,2}, 李占斌^{1,2,3}, 陈怡婷^{1,2}, 袁水龙^{1,2}, 王伟^{1,2}

(1. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 西安 710048;

3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为科学认识黄土丘陵区淤地坝系结构特征,对黄土丘陵区第三副区车路沟坝系沟道特征、库容分布特征、泥沙淤积及蓄水量分布特征进行了总结,并对坝系的级联方式进行了解析,对把口站的水沙变化趋势进行了分析。结果表明:(1)车路沟流域随着沟道级别的提高,沟道平均面积增大,平均沟长增加,平均比降减小;Ⅰ级沟道小型坝的数量最多,Ⅱ级沟道中型坝数量最多,Ⅲ级和Ⅳ级沟道则以骨干坝建设为主。(2)随着沟道级别的提高,骨干坝的总库容、设计防洪库容和设计淤积库容表现为逐渐增大,中型坝、小型坝的总库容和设计防洪库容表现为逐渐减小,设计淤积库容先增大后减小。(3)车路沟坝系中型坝和小型坝的设计淤积库容已经几乎淤满,而骨干坝还剩余较大的淤积库容。(4)车路上游坝系单元通过拦蓄洪水泥沙为下游主沟的淤地坝减轻防洪压力,坝系单元内部各中小型坝尽快淤积成地,车路沟坝系仍有较大的淤地潜力;随着车路沟淤地坝系的建设,流域把口站的水沙趋势发生了明显变化。研究成果以期为黄土高原淤地坝系建设管理提供参考。

关键词:淤地坝系;级联方式;水沙变化

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0026-05

Analysis of Structural Characteristics of Typical Check Dam System in the Third Subregion of Loess Hilly Region

YU Tao^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2,3}, CHEN Yiting^{1,2}, YUAN Shuilong^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, State

Forestry Administration, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory

Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to scientifically understand the structural characteristics of check dam system in loess hilly region, we summarize the characteristics of gully channel, reservoir capacity distribution, sediment deposition and water storage distribution in the third subregion of the loess hilly region, as well as analyze the cascade mode of the check dam system and the variation trend of water and sediment at the gate station. The results showed that: (1) as the channel level increased, the average channel area increased, the average groove length increased, and the average ratio decreased; the number of class I channel small dams was the largest, the number of class II channel medium dams was the largest, as well as the class III and class IV channels were mainly based on backbone dams; (2) as the channel level increased, the total storage capacity, the designed flood storage capacity and the designed deposition capacity of the key dams were gradually increasing, while the total storage capacity and design flood storage capacity of medium dams and small dams gradually reduced, as well as the designed siltation capacity was first increased and then decreased; (3) the designed silt capacity of medium and small dams was almost full, while the key dams still had a large siltation capacity in the dam system of Chelugou watershed; (4) the upstream dam system reduced the flood control

收稿日期:2018-10-18

修回日期:2018-11-05

资助项目:国家自然科学基金面上项目“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204)

第一作者:宇涛(1969—),男,陕西乾县人,在读博士,研究方向为水土资源保护与管理。E-mail:1228214611@qq.com

通信作者:李占斌(1962—),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zhanbinli@126.com

pressure of dams which are located in the downstream main ditch by holding back the flood and silt; the small and medium dams inside the dam system were silted into the ground as soon as possible, and the Chelugou dam system still had a large potential for siltation. With the construction of Chelugou check dam system, the trend of water and sediment had changed obviously in the outlet station of the watershed. The research results are intended to provide a scientific reference for the construction and management of check dams system on the Loess Plateau.

Keywords: check dam system; cascade mode; water and sediment change

淤地坝作为黄土高原最主要的沟道治理措施,在黄土高原大量建设,截至2011年第一次全国水利普查,黄土高原仍有淤地坝5.6万座,且大多数淤地坝已经形成了坝系^[1]。淤地坝系是为了拦蓄沟道洪水和泥沙,改善小流域生态经济环境,提高水土资源开发利用效果,在小流域各级沟道科学布设骨干坝、中、小型淤地坝,形成有机结合、功能协调、具有树形结构的小流域沟道工程体系^[2-3]。坝系规划是指在防治水土流失的前提下,科学合理地布设淤地坝,使坝系的投资最少^[4]。能够让单个淤地坝发挥最大的作用,并且形成具有防洪、拦泥、生产等综合功能的淤地坝系统,是坝系规划的重点内容,更是淤地坝建设运行和管理中首先要解决的问题^[5]。目前针对淤地坝系规划建设的研究已有大量报道,水利部黄河水利委员会绥德水土保持试验站于1983年,使用正交试验分析法,探索小流域淤地坝坝系的建坝密度、建坝顺序、骨干坝位置、建坝时间间隔及泄水建筑物结构组成等方面的优化设计方案^[6]。部分学者在90年代以后利用非线性规划等技术对坝高和建坝时间进行优化规划研究^[7-8]。刘志刚等^[9]基于现有的黄土高原小流域基础数据,运用“3S”技术、计算机图形技术、数据库技术、虚拟现实技术等,开发了小流域坝系规划三维可视化决策支持系统。王丹等^[10]选取黄土丘陵第一副区韭园沟坝系为研究对象,综合考虑经济、安全及效益等各方面因素,构建了淤地坝系布局评价系统。王丹等^[11]对宁夏典型流域淤地坝的运行风险进行了综合评价。目前关于淤地坝系的研究多处于淤地坝系的规划设计阶段,针对已建成坝系的研究还较少;且研究区大多处于黄土丘陵第一副区,针对黄土丘陵第三副区的研究鲜有报道,因此研究黄土丘陵第三副区典型淤地坝系结构特征具有重要意义。本研究通过对黄土丘陵第三副区车路沟坝系沟道特征、库容分布特征、泥沙淤积及蓄水量分布特征总结,并对坝系的级联方式进行解析,以及对把口站的水沙变化趋势进行分析,阐明黄土丘陵第三副区典型淤地坝系的结构特征。研究成果以期对黄土高原淤地坝系建设管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

车路沟流域位于宁夏回族自治区西吉县东部,流域距县城约15 km。属渭河水系一级支流葫芦河的一级支沟,流域面积89.5 km²,相对高差339 m,为黄土丘陵沟壑第三副区。流域在平面上呈三角形,主要支沟有大坪和鸽子川两条,主沟道平均比降为1/180。流域气候属于中温带半湿润向半干旱过度类型,具有大陆性季风气候,多年平均气温为4.9℃,最高气温32.6℃,最低气温-27.9℃。降雨量少,且时空分布不均,多年平均降雨量448 mm,最大降雨量667.6 mm,最小降雨量206.8 mm。年径流模数3.5万 m³/km²,年侵蚀模数4 800 t/km²,水土流失面积78.3 km²,占流域总土地面积87.5%,沟道长度73.39 km,沟壑密度0.82 km/km²,强度侵蚀以上面积占水土流失面积46.61%^[12]。水土流失以水蚀为主,兼有重力侵蚀。西吉车路沟坝系共有淤地坝44座,其中骨干坝10座,中型坝16座,小型坝18座。

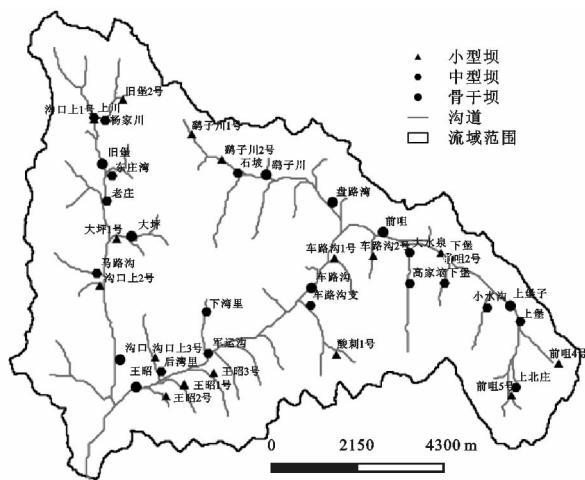


图1 西吉车路沟坝系布局

1.2 数据来源与分析

车路沟流域淤地坝资料来源于宁夏回族自治区水利局,主要包括淤地坝位置、建坝时间、总库容、防洪库容、淤积库容、已淤积库容和蓄水量等数据。夏寨水文站为车路沟流域的把口站,共收集到其1984—2004年、

2007—2014 年的日平均流量和含沙量数据,所涉及的流量、含沙量等的测量和试验分析严格按照国际标准进行,数据来源于宁夏水文局^[13]。根据水文监测的相关标准^[14],本研究以径流深>0.05 mm,洪峰流量>0.1 m³/s,历时超过 150 min 的汛期径流事件为一次洪水事件^[15]。流域的 DEM 数据来源于中国地理数据云,精度为 30 m。主要通过软件 ArcGIS 10.1 和 Excel 2010 对数据进行分析,沟道和子流域通过 SWAT 中的流域划分(Watershed Delineator)工具进行提取,最小控制面积为 0.1 km²,通过 Mann-Kendall(M-K)检验对水沙变化趋势进行分析。

2 结果与分析

2.1 车路沟流域沟道特征分析

根据美国地貌学家 R. E. Horton 和 A. N. strahler 提出的地貌几何定量的数学模型分级方法^[16],对于小流域的分析类比较为科学,该方法强调在一个流域内最小的不可分枝的支沟属于第一级水道,以此类推,直到全流域水道划分完毕。通过全流域的沟道为最高级水道,也就是小流域的流域等级,这种方法显著的特点是同级沟道侵蚀形态具有明显的相似性。由表 1 可得,随着沟道级别的提高,沟道平均面积增大,平均沟长增加,但沟道的平均比降减小。由于 I 级沟道控制面积较小,但数量巨大,因此以建设小型坝为主;II 级沟道控制面积增大,沟道数量减少,以建设中型坝为主;III 级、IV 级沟道控制面积进一步增大,区间来水来沙量巨大,因此以建设沟道骨干工程为主。

表 1 车路沟沟道特征分析

| 项目 | I 级 | II 级 | III 级 | IV 级 |
|----------------------|------|------|-------|-------|
| 沟道数量/条 | 37 | 8 | 1 | 1 |
| 平均面积/km ² | 1.32 | 4.84 | 28.55 | 89.88 |
| 平均沟长/km | 1.11 | 2.26 | 10.04 | 18.48 |
| 平均比降/% | 4.20 | 3.70 | 2.05 | 0.65 |

2.2 淤地坝系分布特征分析

由表 2 可以看出,西吉车路沟坝系共有淤地坝 44 座,其中骨干坝 10 座,中型坝 16 座,小型坝 18 座。I 级沟道小型坝的数量最多,II 级沟道中型坝的数量最多,III 级和 IV 级沟道骨干坝的数量最多。随着沟道级别的提高,骨干坝占比逐渐增大,中型坝和小型坝的占比逐渐减小,因此主沟道以骨干坝建设为主,同时修建部分中型坝和小型坝,支沟则以小型坝和中型坝建设为主。车路沟坝系 I 级沟道小型坝的数量虽然最多,但中型坝的坝控面积最大,占 I 级沟道坝控面积的 59.40%;II 级、III 级和 IV 级沟中,骨干坝的坝控面积最大,中型坝次之,小型坝最小,因此坝系中骨干坝的

数量虽然最少,但是在流域中起到控制性作用;随着沟道级别的提高,骨干坝的坝控面积逐渐增大,中型坝和小型坝的坝控面积逐渐减小(表 3)。

表 2 车路沟坝系淤地坝分布特征统计

| 等级 | 骨干坝/ 座 | 占比/ % | 中型坝/ 座 | 占比/ % | 小型坝/ 座 | 占比/ % | 合计/ 座 |
|-------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| I 级 | 0 | 0.00 | 8 | 40.00 | 12 | 60.00 | 20 |
| II 级 | 3 | 27.27 | 5 | 45.45 | 3 | 27.27 | 11 |
| III 级 | 2 | 50.00 | 1 | 25.00 | 1 | 25.00 | 4 |
| IV 级 | 5 | 55.56 | 2 | 22.22 | 2 | 22.22 | 9 |
| 小计 | 10 | 22.73 | 16 | 36.36 | 18 | 40.91 | 44 |

表 3 车路沟坝控面积分布特征统计

| 等级 | 骨干坝/ km ² | 占比/ % | 中型坝/ km ² | 占比/ % | 小型坝/ km ² | 占比/ % | 合计/ km ² |
|-------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|------------------------|
| I 级 | 0.00 | 0.00 | 15.95 | 59.40 | 10.90 | 40.60 | 26.85 |
| II 级 | 16.80 | 51.90 | 12.75 | 39.39 | 2.82 | 8.71 | 32.37 |
| III 级 | 19.00 | 83.04 | 2.90 | 12.67 | 0.98 | 4.28 | 22.88 |
| IV 级 | 32.36 | 83.66 | 4.75 | 12.28 | 1.57 | 4.06 | 38.68 |
| 小计 | 68.16 | 56.43 | 36.35 | 30.10 | 16.27 | 13.47 | 120.78 |

2.3 淤地坝系设计库容分布特征

西吉车路沟坝系总库容 1 453.21 万 m³,其中骨干坝库容 1 011.68 万 m³,占总库容 69.62%;中型坝库容 335.06 万 m³,占总库容 23.06%;小型坝库容 106.47 万 m³,占总库容 7.33%;I 级沟道中,中型坝库容最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝库容最大,中型坝次之,小型坝最小。随着沟道级别的提高,骨干坝的总库容表现为逐渐增大,中型坝和小型坝的总库容表现为逐渐减小(表 4)。由图 2A 可以看出,I 级沟道中,中型坝的设计防洪库容最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝的设计防洪库容最大,中型坝次之,小型坝最小。随着沟道级别的提高,骨干坝的设计防洪库容表现为逐渐增大;中型坝和小型坝逐渐减小。由图 2B 可以看出,I 级沟道中,中型坝的设计淤积库容最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝的设计淤积库容最大,中型坝次之,小型坝最小。随着沟道级别的提高,骨干坝的设计淤积库容表现为逐渐增大;中型坝和小型坝的设计淤积库容表现为先增大后减小。

表 4 车路沟淤地坝总库容分布特征统计

| 等级 | 骨干坝/ m ³ | 占比/ % | 中型坝/ 万 m ³ | 占比/ % | 小型坝/ 万 m ³ | 占比/ % | 合计/ 万 m ³ |
|-------|------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|-------------------------|
| I 级 | 0.00 | 0.00 | 143.84 | 66.86 | 71.29 | 33.14 | 215.13 |
| II 级 | 227.78 | 62.43 | 118.35 | 32.44 | 18.71 | 5.13 | 364.84 |
| III 级 | 285.65 | 89.78 | 26.16 | 8.22 | 6.34 | 1.99 | 318.15 |
| IV 级 | 498.25 | 89.76 | 46.71 | 8.41 | 10.13 | 1.82 | 555.09 |
| 小计 | 1011.68 | 69.62 | 335.06 | 23.06 | 106.47 | 7.33 | 1453.21 |

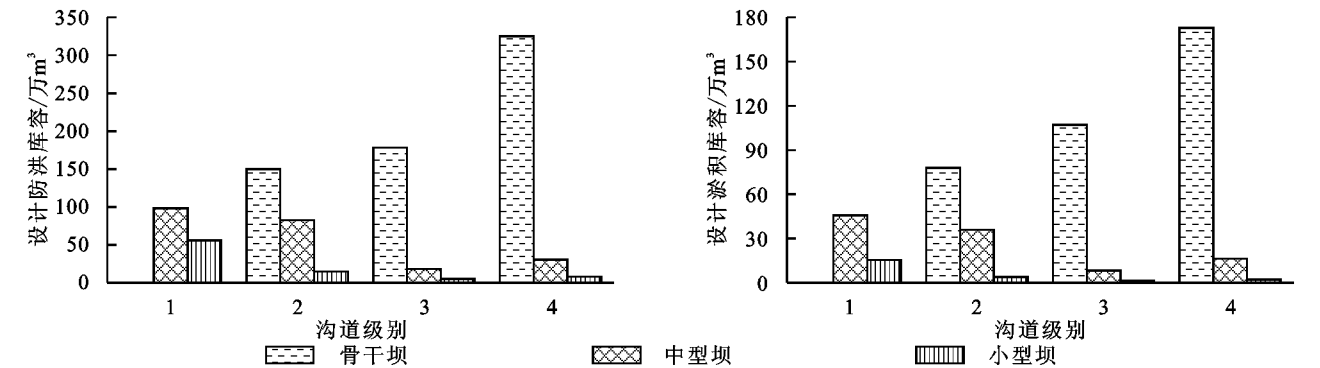


图 2 车路沟淤地坝系设计库容分布特征

2.4 淤地坝系泥沙淤积和蓄水量分布特征

对车路沟淤地坝系泥沙淤积和蓄水量分布特征进行统计(图 3)。由图 3A 可以看出,Ⅰ级沟道中,中型坝的已淤积库容最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝的已淤积库容最大,中型坝次之,小型坝最小。骨干坝在Ⅱ级和Ⅲ级沟道中的已淤积库容基本相等,而Ⅳ级的已淤积库容几乎是Ⅱ级和Ⅲ级沟道已淤积库容的总和;中型坝和小型坝的已淤积库容随着沟道级别的提高,表现为先减小后增大。由图 3B 可以看出,Ⅰ级和Ⅱ级沟道中,中型坝的蓄水量最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝的蓄水量最大,中型坝次之,

小型坝最小。随着沟道级别的提高,骨干坝的蓄水量逐渐增大;中型坝和小型坝的蓄水量表现为先减小后增加。车路沟坝系总剩余淤积库容 265.04 万 m³,其中骨干坝剩余淤积库容 244.67 万 m³,占总剩余淤积库容 92.31%;中型坝剩余淤积库容 11.26 万 m³,占总剩余淤积库容 4.25%;小型坝已淤积库容 9.11 万 m³,占总剩余淤积库容 3.44%(表 5)。车路沟坝系中型坝和小型坝的设计淤积库容已经几乎淤满,而骨干坝还剩余较大的淤积库容。Ⅰ级沟道中,中型坝的剩余淤积库容最大,小型坝次之,骨干坝最小;其余各级沟道表现为,骨干坝的剩余淤积库容最大,中型坝次之,小型坝最小。

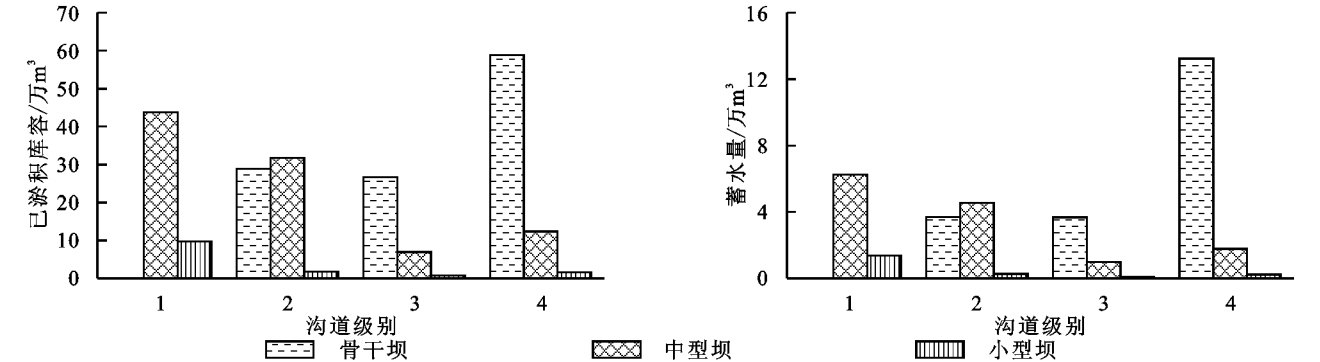


图 3 车路沟淤地坝系泥沙淤积和蓄水量分布特征

| 表 5 车路沟淤地坝系剩余淤积库容分布特征统计 | | | | | | |
|-------------------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| 等级 | 骨干坝/ | 占比/ | 中型坝/ | 占比/ | 小型坝/ | 占比/ |
| | 万 m ³ | % | 万 m ³ | % | 万 m ³ | % |
| Ⅰ级 | 0.00 | 0.00 | 1.96 | 25.96 | 5.59 | 74.04 |
| Ⅱ级 | 49.01 | 88.40 | 4.23 | 7.63 | 2.20 | 3.97 |
| Ⅲ级 | 81.55 | 97.70 | 1.23 | 1.47 | 0.69 | 0.83 |
| Ⅳ级 | 114.11 | 96.23 | 3.84 | 3.24 | 0.63 | 0.53 |
| 小计 | 244.67 | 92.31 | 11.26 | 4.25 | 9.11 | 3.44 |

2.5 淤地坝系级联方式解析

根据车路沟坝系调查资料,结合小流域水系图,对车路沟坝系结构进行解析,结果如图 4 所示。车路沟坝系在总体上可划分为 4 个坝系单元,分别为沟口坝系单元、王昭坝系单元、盘路湾坝系单元、前咀坝系单元。车路沟坝系框架布局中各单坝与坝系单元之间存在明确

的控制或从属关系,王昭坝系单元控制着盘路湾和前咀坝系单元,盘路湾坝系单元和前咀坝系单元互为并联关系,王昭坝系单元处于上中游位置,其对洪水泥沙的拦截起着承上启下的作用,通过拦截上游下泄的洪水来缓解干沟淤地坝的防洪压力(图 4)。

对车路沟坝系单元关系特征统计可以看出,车路沟小流域坝系单元平均控制面积为 29.85 km²,各坝系单元建坝数量在 5~14 座之间,每个坝系单元平均布坝 11 座,大、中、小型淤地坝配置比例为 5:8:9;各坝系单元对洪水泥沙的控制关系表现为联合拦蓄、互为补充、彼此协调,上游的坝系单元通过拦蓄洪水泥沙为下游干沟淤地坝减轻防洪压力,坝系单元内部各中小型坝尽快淤积成地。车路沟坝系总库容 1 437 万 m³,当前车路沟坝系拦泥量为 220.82 万 m³,占总

库容的 15.37%，说明整个坝系淤地很少，还具有很大淤积潜力(表 6)。

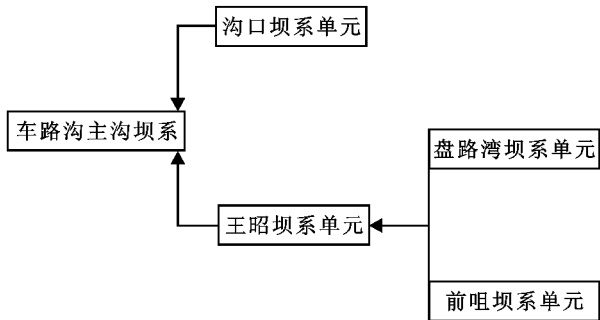


图 4 西吉车路沟域坝系单元控制关系框架

2.6 淤地坝系把口站水沙变化趋势分析

夏寨水文站位于葫芦河支流车路沟上，为车路沟

流域的把口站。测站断面与夏寨水库都位于西吉县城附近，控制流域面积 89.5 km²，自 1972 年建站至今，主要观测内容包括河道水位、流量、含沙量等。从宁夏水文局获取了夏寨站 1984—2004 年、2007—2014 年的次洪和含沙量资料，所涉及的流量、含沙量等的测量和试验分析严格按照国际标准进行。Mann-Kendall(M-K)检验被广泛应用于降水、径流和水质等水文气象序列的趋势变化^[17-18]。通过 M-K 检验对水沙数据进行趋势变化分析，结果见表 7。由表 7 可以看出，夏寨站的洪峰流量和最大含沙量呈减小趋势，洪峰流量的突变点发生在 2003 年，最大含沙量的突变点发生在 2004 年，这可能与车路沟在 2004 年前后开始进行淤地坝建设有关。

表 6 车路沟坝系单元关系特征

| 项目 | | 单位 | 坝系单元 | | | | 合计 | 平均 |
|-------|------|----|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
| | | | 沟口 | 王昭 | 盘路湾 | 前咀 | | |
| 沟长 | km | | 9.137 | 7.04 | 5.159 | 6.544 | 27.88 | 6.97 |
| 比降 | ‰ | | 28.5 | 5 | 33.7 | 16 | 83.20 | 20.80 |
| 单元面积 | km² | | 38.82 | 29.89 | 17.49 | 33.18 | 119.38 | 29.845 |
| 坝库数量 | 座 | | 12 | 14 | 5 | 13 | 44 | 11 |
| 外控关系 | | | | | 上控 | 上控 | | |
| | | | | | 王昭 | 王昭 | | |
| 内控关系 | 大 | 座 | 3 | 2 | 2 | 3 | 10 | 2.5 |
| | 中 | 座 | 5 | 4 | 1 | 6 | 16 | 4 |
| | 小 | 座 | 4 | 8 | 2 | 4 | 18 | 4.5 |
| 单元总库容 | 万 m³ | | 475.28 | 349.25 | 213.61 | 398.86 | 1437 | 359.25 |
| 已淤库容 | 万 m³ | | 64.59 | 51.184 | 30.43 | 74.62 | 220.82 | 55.21 |
| 剩余库容 | 万 m³ | | 410.69 | 298.066 | 183.18 | 324.24 | 1216.18 | 304.04 |
| 大型占占比 | ‰ | | 25.00 | 14.29 | 40.00 | 23.08 | 102.36 | 25.59 |
| 库容淤积率 | ‰ | | 13.59 | 14.66 | 14.25 | 18.71 | 61.20 | 15.30 |

表 7 车路沟坝系单元关系特征

| 站点 | 指标 | M-K 检验 | | |
|----|-------|--------|------|----------|
| | | Z | 突变点 | 显著性 |
| 夏寨 | 洪峰流量 | -2.79 | 2003 | $p<0.01$ |
| | 最大含沙率 | -4.35 | 2004 | $p<0.01$ |

3 结论

(1) 车路沟流域随着沟道级别的提高，沟道平均面积增大，平均沟长增加，平均比降减小。Ⅰ级沟道小型坝的数量最多，Ⅱ级沟道中型坝的数量最多，Ⅲ级和Ⅳ级沟道骨干坝的数量最多。Ⅰ级沟道小型坝的数量虽然最多，但中型坝的坝控面积最大，占Ⅰ级沟道坝控面积的 59.40%；Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级沟中，骨干坝的坝控面积最大，中型坝次之，小型坝最小。

(2) 西吉车路沟坝系总库容 1 453.21 万 m³，其中骨干坝库容占总库容 69.62%，中型坝占总库容 23.06%；小型坝占总库容 7.33%；随着沟道级别的提高，骨干坝的总库容和设计防洪库容表现为逐渐增

大，中型坝和小型坝表现为逐渐减小；随着沟道级别的提高，骨干坝的设计淤积库容表现为逐渐增大；中型坝和小型坝表现为先增大后减小。

(3) 车路沟坝系中型坝和小型坝的设计淤积库容已经几乎淤满，而骨干坝还剩余较大的淤积库容。Ⅰ级沟道中，中型坝的剩余淤积库容最大，小型坝次之，骨干坝最小；其余各级沟道表现为，骨干坝的剩余淤积库容最大，中型坝次之，小型坝最小。

(4) 车路沟坝系框架布局中各单坝与坝系单元之间存在明确的控制或从属关系，各坝系单元对洪水泥沙的调控表现为联合拦蓄、互为补充、彼此协调；上游坝系单元通过拦蓄洪水泥沙为下游干沟淤地坝减轻防洪压力，坝系单元内部各中小型坝尽快淤积成地。车路沟坝系总库容 1 437 万 m³，当前车路沟坝系拦泥量为 220.82 万 m³，占总库容的 15.37%，仍具有很大淤地潜力；随着车路沟淤地坝系的建设，流域把口站的水沙趋势发生了明显变化。

义,备受国内外研究人员的关注。本文提出的基于 DEM 流域地貌特征分形量化因子计算模型,利用分形维数的标度不变性,实现了一定的像元尺度范围内流域地貌形态特征量化指标的尺度不变,从而可以实现不同像元尺度下地貌形态特征的比较与评价。FBM 地貌因子克服了传统地貌形态单因子指标的不足,可以对流域地貌形态特征进行综合性表达,为地貌因子量化研究提供了新思路与新角度。但是由于流域地貌特征分形量化计算模型的地域适应性还需要经过更多地貌类型的验证,后续研究重点应该继续放在对其他地貌类型区的检验方面,并在此基础上更加深入的探讨分形量化模型的普适性问题。

参考文献:

[1] 魏霞,李占斌,李勋贵. 黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.

[2] 李勉,李占斌,刘普灵. 中国土壤侵蚀定量研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(3):243-248.

[3] 张霞,李鹏,李占斌,等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. 农业工程学报,2015,31(4):129-136.

[4] 朱永清,李占斌,崔灵周. 流域地貌形态特征量化研究进

展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(9):149-155.

[5] 沈中原. 黄土高原流域土壤侵蚀下垫面特征及其对水土流失的作用研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.

[6] 尹国康,陈钦峦. 黄土高原小流域特征性指标与产沙统计模式[J]. 地理学报,1989,44(1):32-44.

[7] 蔡强国. 流域产沙模型概述[J]. 中国水土保持,1990(6):14-18.

[8] 李矩章,景可,李凤新. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀模型探讨[J]. 地理科学进展,1999,18(1):46-53.

[9] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究,2001,20(3):275-281.

[10] Phillips J. Nonlinear dynamics and the evolution of relief[J]. *Geomorphology*, 1995,14(1):57-64.

[11] 李旭涛,曹汉强,赵鸿燕. 分形布朗运动模型及其在地形分析中的应用[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2003,31(5):50-52.

[12] 孟伟,李润奎,段峥,等. 基于地貌特征的数字高程模型融合方法[J]. 地球信息科学学报,2018,20(7):895-905.

[13] 于子凡,林宗坚. 基于图像表面积的分形布朗运动分数维算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(2):161-165.



(上接第 30 页)

参考文献:

[1] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河,2017,39(4):1-5.

[2] 张晓明. 黄土高原小流域淤地坝系优化研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.

[3] 郑宝明,田永宏,郭玉梅. 黄土丘陵沟壑区第一副区小流域坝系建设理论与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.

[4] 李斌斌. 下垫面变化情况下黄土丘陵沟壑区坝系优化配置研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.

[5] 蔺明华,王志意,段文中. 淤地坝研究的回顾与展望[J]. 中国水利,2003(17):62-64.

[6] 武永昌,黄林. 骨干坝系最佳建筑时间的存在条件及实际淤积期的计算[J]. 中国水土保持,1995(6):91-96.

[7] 秦向阳,郑新民. 小流域治沟骨干坝系优化规划模型研究[J]. 中国水土保持,1994(1):18-22.

[8] 蔺明华,程益民. 小流域坝系优化规划模型及其应用[J]. 人民黄河,1995(11):29-33.

[9] 刘志刚,龚建华. 黄土高原小流域坝系规划决策支持系统研究[J]. 人民黄河,2017,39(12):85-89.

[10] 王丹,李占斌,李鹏,等. 韭园沟流域淤地坝坝系布局评

价[J]. 水土保持研究,2016,23(5):49-55.

[11] 王丹,哈玉玲,李占斌,等. 宁夏典型流域淤地坝系运行风险评价[J]. 中国水土保持科学,2017,15(3):17-25.

[12] 黄河水利委员会水土保持局. 黄土高原上的明珠:小流域淤地坝坝系工程集锦之一[M]. 郑州:黄河水利委员会,2008.

[13] Xu J. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 1999,36(1/2):1-19.

[14] Zheng M, Li R, He J. Sediment concentrations in runoff varying with spatial scale in an agricultural subwatershed of the Chinese Loess Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(26):5414-5423.

[15] 张乐涛,李占斌,王贺,等. 流域系统径流侵蚀链内泥沙输移的空间尺度效应[J]. 农业工程学报,2016,32(13):87-94.

[16] 张丽萍. 祖厉河流域侵蚀地貌的数理分析[J]. 中国水土保持,2004(3):12-15.

[17] 任宗萍,马勇勇,王有胜,等. 生态建设条件下无定河不同地貌区径流变化归因分析[J]. 生态学报,2019,39(7):1-10.

[18] 秦丽欢,周敬祥,李叙勇,等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J]. 生态学报,2018,38(6):1941-1951.