

延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析

焦菊英^{1,2}, 王志杰^{2,3}, 魏艳红², 苏 媛^{1,3}, 曹斌挺¹, 李玉进¹

(1. 西北农林科技大学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, 杨凌 712100; 2. 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, 杨凌 712100; 3. 贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对黄土高原目前侵蚀环境明显改善条件下能否经受得住极端暴雨事件的考验及可能出现的问题, 该文依据在延河6个典型小流域的植被调查及土壤侵蚀监测结果, 分析了2013年极端暴雨条件下延河流域不同尺度的侵蚀产沙特征。结果表明, 天然乔木(辽东栎和三角槭)植被的平均侵蚀强度 $<1\ 000\ \text{t}/\text{km}^2$, 自然灌木植被在 $1\ 118.1\sim 1\ 161.2\ \text{t}/\text{km}^2$ 之间, 演替中后期的草本植被在 $1\ 245.2\sim 1\ 827.8\ \text{t}/\text{km}^2$ 之间, 而演替中前期的草本植被在 $3\ 087.6\sim 4\ 408.4\ \text{t}/\text{km}^2$ 之间; 人工灌木林($2\ 119.7\sim 2\ 183.9\ \text{t}/\text{km}^2$)比人工乔木林($2\ 625.7\sim 5\ 149.6\ \text{t}/\text{km}^2$)具有较强的减蚀能力。坡面良好的植被覆盖能有效抵御暴雨侵蚀, 小流域坡面平均侵蚀强度基本 $<2\ 500\ \text{t}/\text{km}^2$; 但滑坡侵蚀占主导地位, 占各小流域侵蚀总量的 $49.0\%\sim 88.5\%$, 特别是距暴雨中心较近流域的南部2个小流域的滑坡侵蚀可达 $7\ 290.3$ 和 $7\ 424.9\ \text{t}/\text{km}^2$ 左右。不同小流域内有 $6.4\%\sim 18.3\%$ 的侵蚀量淤积在沟道里; 延河甘谷驿以上不同河段的淤积量为 $13.2\sim 145.2$ 万t, 平均占总侵蚀产沙量的 15% 。延河甘谷驿控制区的侵蚀产沙强度变化在 $2\ 326.7\sim 7\ 774.4\ \text{t}/\text{km}^2$ 之间, 其中强度为 $5\ 000\sim 8\ 000\ \text{t}/\text{km}^2$ 的面积占 59.3% 。因此, 加强沟间地径流蓄排措施, 减轻坡面径流下沟对沟坡重力侵蚀的影响, 是土壤侵蚀研究与防治中值得重视的问题。

关键词: 土壤; 侵蚀; 滑坡; 极端降雨事件; 植被恢复; 侵蚀产沙

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.021

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-13-0159-09

焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 苏 媛, 曹斌挺, 李玉进. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 159-167. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.021 http://www.tcsae.org

Jiao Juying, Wang Zhijie, Wei Yanhong, Su Yuan, Cao Binting, Li Yujin. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(13): 159-167. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.021 http://www.tcsae.org

0 引言

黄土丘陵区独特的自然环境与不合理的土地利用, 致使其成为中国乃至世界上水土流失与生态系统退化最为严重的地区之一, 也成为中国生态环境建设的重点与难点区域。植被是生态系统物质循环和能量交换的枢纽, 是防治生态退化的物质基础。因此, 植被恢复是该区水土流失治理与生态安全的根本途径。黄土高原地区的植被恢复与建设已有50多年的历史, 但整体效果不佳, 表现为植被自然恢复缓慢, 人工植被物种单一、保存率低等问题^[1-3], 无法满足当前社会经济发展对生态环境的需求。为了进一步控制水土流失、恢复生态环境, 国家于1999年开始大规模地实施了退耕还林(草)工程。时至今日, 退耕政策实施已十年有余, 大量的研究表明黄土高原地区不同尺度的植被覆盖度显著增加, 水土流失明显减轻, 黄河输沙量发生锐减^[4-8]。然而, 在全球气候

变暖的大背景下, 极端气候事件呈现多发态势^[9]。黄土高原近几年频繁发生极端暴雨事件, 如2010年9月19日河龙区间中部大暴雨、2012年07月21日河龙区间北部大暴雨、2012年07月27日河龙区间中部大暴雨、及2013年7月3-27日延安地区长历时暴雨。其中2013年延安地区的暴雨是自1945年有气象记录以来过程最长、强度最大、暴雨日最多且间隔时间最短的持续强降雨过程, 超过百年一遇的标准, 暴雨中心位于延安市宝塔区, 降雨量高达 $792.9\ \text{mm}$, 是其常年全年平均降雨量的一倍多。因此, 目前人们更关注的问题是黄土高原的生态恢复, 特别是退耕还林(草)工程能否经受得住极端降雨事件的考验, 出现的问题会是什么? 恰巧作者团队于2013年在黄土丘陵沟壑区延河6个典型小流域开展了植被调查及土壤侵蚀监测。因此, 本文在分析延河流域典型小流域植被特征及不同植被类型土壤侵蚀特征的基础上, 并通过典型小流域滑坡侵蚀和沟道(河道)泥沙淤积量的调查, 探明2013年极端暴雨条件下的小流域和延河流域侵蚀产沙特征, 以期今后土壤侵蚀治理与植被建设提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

延河流域的地理位置为 $36^{\circ}23'\sim 37^{\circ}17'N$ 、 $108^{\circ}45'\sim$

收稿日期: 2017-01-10 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目课题“黄土高原生态修复的土壤侵蚀效应与控制机制(2016YFC0501604)”; 国家自然科学基金面上项目“黄丘区坡面退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理(41371280)”

作者简介: 焦菊英, 女, 陕西宝鸡, 博士, 研究员。研究方向: 流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

110°28'E, 地处陕西省北部的黄土高原中部, 是黄河中游河口镇至龙门区间的一级支流, 全长 286.9 km, 流域总面积为 7 687 km² (图 1)。延河流域属暖温带半干旱大陆性季风气候区, 多年平均降水量约为 520 mm, 其中 7—9 月降水量占全年降水量的 70% 以上, 且多为暴雨; 平均气温为 8.8~10.2 °C, 平均日温差 13 °C; 多年平均水面蒸发量为 897.7~1067.8 mm, 干旱指数为 1.57~1.92; 年均日照时数为 2 450 h, 无霜期为 157~187 d^[10-11]。延河流域的主要土壤类型是黄绵土, 占总土地面积的 85% 以上, 颗粒组成以粉粒为主, 土质疏松, 抗冲抗蚀能力差。延河流域地势西北高东南低, 地形破碎, 梁峁起伏, 沟道密布, 沟壑密度为 2.1~4.6 km/km², 河网密度约为 4.7 km/km², 河道平均比降为 3.29‰; 大部分地区坡度都在 15° 以上, 平均坡度为 17°; 海拔为 495~1 795 m, 平均海拔为 1 218 m^[12-13]。由于过去长期的过度垦殖和不合理的开发, 延河流域天然地带性植被零星残存且天然草地退化, 在 1999 年实施了退耕还林(草)政策后植被状况发生了巨大变化^[14-15]。

本研究在延河流域由南到北选取 6 个典型小流域开展调查与分析, 分别为南部的毛堡则和尚合年小流域, 中部的陈家峁和张家河小流域, 以及北部的石子湾和高家沟小流域(图 1)。

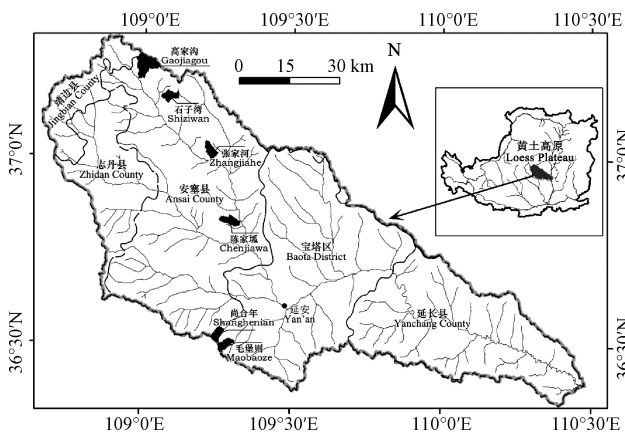


图 1 延河流域和 6 个典型小流域位置示意图

Fig.1 Location of Yanhe River basin and six typical small watersheds

1.2 数据来源

研究区 1:5 000 高分辨率遥感影像来源于 Google Earth 卫星数据服务平台, 空间分辨率为 5m×5m, 坐标系是 Beijing_1954_3_Degree_GK_Zone_36 投影坐标系; DEM 和土地利用数据均来源于中国科学院水利部水土保持研究所, 空间分辨率均为 30m×30m。

2013 年延河流域降雨数据来源于陕西省水利厅网站的每日雨情简报。依据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准: 24 小时降雨总量在 25.0~49.9 mm 为大雨, 24 h 降雨总量 ≥50.0 mm 为暴雨, 统计 2013 年延河流域大雨、暴雨日数及降雨量, 雨量站有安塞、宝塔、子长、志丹、延川、延长、靖边、甘泉。侵蚀性降雨量是以日降雨量 ≥12 mm 统计的^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 植被调查

依据 1:5 000 高分辨率遥感影像, 在对 6 个典型小流域土地利用类型进行室内解译的基础上, 于 2012 年采用对坡勾绘的方法进行野外实地勾绘, 对室内解译的植被类型图斑按照植物群系类型进行细化; 同时, 对各图斑进行植被样方调查(样方大小草本为 2 m×2 m, 灌木为 5 m×5 m, 乔木为 10 m×10 m), 包括植被物种组成与盖度等; 并运用手持 GPS 记录各样地的经纬度、海拔与坡向, 用坡度仪测量坡度。进而, 对野外勾绘的土地利用类型图和植被图在 ArcGIS10.0 软件平台上数字化, 共勾绘出植被图斑 5 311 个, 其中石子湾流域 482 个, 高家沟流域 1 221 个, 陈家峁流域 2 345 个, 张家河流域 240 个, 尚合年流域 709 个, 毛堡则流域 314 个。

1.3.2 坡面土壤侵蚀量观测

以植物群系面积分布的广泛性和自然演替各个阶段的代表性为原则, 选取了 14 种代表性植物群系, 即自然演替的草本植被有茵陈蒿、达乌里胡枝子、铁杆蒿、长芒草和白羊草群系, 自然演替的灌丛植被有狼牙刺和丁香群系, 自然演替的乔木植被有辽东栎和三角槭群系, 人工乔木植被有刺槐(包括 6~8 年刺槐和 15 年刺槐)和杏树群系, 人工灌丛植被有沙棘和柠条群系, 采用侵蚀针法对不同植被类型的土壤侵蚀量进行观测。

在 6 个小流域内选择坡面相对完整、植被类型基本一致的 3~6 个坡沟(共计 36 个), 在每个坡沟上依上(峁顶附近)、中(梁峁坡)、下(沟坡)选择样地(共计 36×3=108 个样地), 于 2013 年雨季前(4 月 20 日—5 月 5 日)在选择的样地进行侵蚀针布设, 即在每个样地内从左至右依次设置 3 个侵蚀针观测小区(2 m×2 m), 在每个小区内按 50 cm×50 cm 的网格布设 9 根侵蚀针。采用的侵蚀针为长度 10 cm、直径约 0.5 cm 的铁钉, 在布设侵蚀针时采用手压或塑胶锤敲击铁钉沿坡面垂直方向潜入土中, 尽可能不干扰监测小区内的土壤表层状况, 以铁钉顶部与坡面平行为准; 并在每根侵蚀针右侧 5 cm 处插一根红色木签, 以便于识别侵蚀针的位置。同时, 记录每个小区的植被类型、植被盖度(多人目估法测算)、坡度(坡度仪测量)、坡向和海拔(手持 GPS 测量)等信息。在雨季结束后(2013 年 10 月 24 日—11 月 9 日), 对每支侵蚀针的侵蚀深或淤积深进行量测, 取其平均值作为监测小区的侵蚀深或淤积深。因布设侵蚀针的部分坡面受到了人为干扰与破坏, 导致一些小区未能量测到, 共量测到的小区 193 个, 但各植物群系小区在各个坡位上均有分布(9~30 个), 可保证数据在不同坡位上的完整性。

另外, 采用环刀法测定各监测小区的土壤容重(每个小区设 3 个重复), 采用黄炎和等^[17]提出方法计算不同监测小区的土壤侵蚀量, 进而得到不同植物群系的平均土壤侵蚀量。然后, 在建立不同植物群系土壤侵蚀量与坡度和盖度关系的基础上, 结合 6 个典型小流域植物群系的分布和植被盖度及小流域坡度数据, 利用 ArcGIS

软件的 Raster Calculate 功能，估算小流域坡面平均土壤侵蚀量。需要说明的是，由于典型小流域内的农耕地以水平梯田为主，坡耕地占流域的面积比例多在 1%左右，最大比例也不超过 5%，因而农耕地对流域土壤侵蚀量的贡献相对较少而未予考虑。

1.3.3 沟坡滑坡侵蚀量观测

依据中国地质调查局《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范》(DD2008-02)^[18]，对布设侵蚀针的 6 个典型小流域由 2013 年暴雨引起的滑坡进行全覆盖踏勘调查，调查包括滑坡的位置、数量与规模，以及滑坡发生坡度、土地利用类型等。按照平行断面法把滑坡划分为楔形体、锥形体、截锥体和梯形体等数段规则的模型，对各段分别按照对应的几何形状的体积计算方法测量和计算滑坡的体积；而对几何形状较规则的滑坡采用常规计算方法计算滑坡的体积。同时，对各滑坡采用环刀法取样（3 个重复）测定土壤容重，以计算滑坡的侵蚀量。

1.3.4 沟道/河道的泥沙淤积量观测

坡面侵蚀针布设的同时（4 月 20 日—5 月 5 日），在 6 个典型小流域的主要支沟和主沟道内也设置侵蚀针观测小区，在各支沟内按沟头、沟中和沟口 3 个部位，每个部位设置 3 个侵蚀针监测小区，每个小区设置 9 根侵蚀针，每根侵蚀测针垂直钉入沟道中，为保证淤积层的判断和淤积深的量测，以铁钉顶部与沟道土层表面平齐为准，于 2013 年 10 月底-11 月初，对各侵蚀针的淤积深进行了测量，并采用环刀法采集土样测定了土壤容重，计算小流域沟道泥沙淤积量。

同时，于 2013 年 11 月初在延河流域甘谷驿水文站控制区内的主要河道内随机选择 12 个调查点（图 2），每个调查点采集 3~5 个样点，测量河道内泥沙的淤积深，也用环刀法采集各采样点土样测定土壤容重，根据采样点在流域内的分布状况，将延河流域的主要河道进行分段统计，计算每一河段的泥沙淤积量，进而求得延河流域甘谷驿水文站控制区的总泥沙淤积量。具体计算公式如下：

$$A = \sum(\rho_i \times D_i \times Area_i) \times 10^4$$

式中 A 为小流域沟道或延河河道总泥沙淤积量， t ； ρ_i 为第 i 条支沟或第 i 河段的土壤容重， g/cm^3 ； D_i 为第 i 条支沟或第 i 河段平均泥沙淤积深， cm ； $Area_i$ 为第 i 条支沟沟道或第 i 河段河道的面积， km^2 。

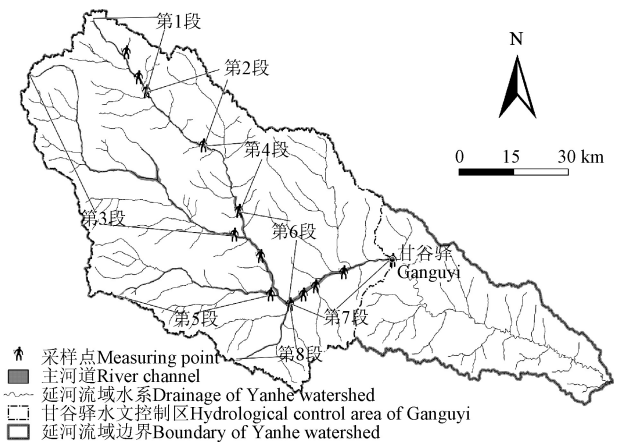


图 2 延河流域河道淤积量测点及河道分段

Fig.2 Measuring points of river channel deposition and river sections in Yanhe River basin

1.3.5 小流域/延河侵蚀产沙量计算

不是所有的侵蚀泥沙都随径流输出流域而进入主河道，有一部分会被拦截而沉积。一般而言，小流域的侵蚀产沙量就是流域的侵蚀量和泥沙淤积量的差值，而在实地调查中发现，经过十余年的退耕还林（草）工程的实施，坡面上已很难发现有细沟、浅沟侵蚀，因此本研究中小流域土壤侵蚀量的计算由坡面侵蚀和滑坡/崩塌侵蚀两部分构成。

利用 GIS 的水文分析功能，运用延河流域 DEM，以甘谷驿水文站控制区为边界，提取小流域 1061 个；再对提取的每个小流域的土地利用类型、坡度、海拔等数据，以上述 6 个典型小流域为依据（表 1）将甘谷驿控制区的小流域聚类为对应的 6 类（图 3）；然后，分别利用对应的 6 个典型小流域的侵蚀产沙量，叠加运算延河流域侵蚀产沙量。

表 1 延河流域侵蚀产沙小流域单元聚类依据

Table 1 Clustering basis of small watershed unit for erosion sediment yield in Yanhe River basin

单元号 Unit number	参考小流域 References small watershed	聚类依据（各要素占流域面积比例） Clustering basis (ratio of each element to basin area)				
		海拔 Elevation	坡度 Gradient	林地 Forest land	草地 Grass land	耕地 Arable land
I	石子湾 Shiziwān	1 300~1 400 m: >50% 1 200~1 400 m: >80%	>35°: >20%	<30%	>60%	<5%
II	高家沟 Gaojiagou	1 300~1 400 m: >50% 1 300~1 500 m: >80%	>35°: <20%	<25%	>60%	>10%
III	张家河 Zhangjiahe	1 300~1 400 m: >40% 1 200~1 400 m: >80%	>35°: >20% 15~35°: 25%~50%	15%~30%	<60%	<5%
IV	陈家峡 Chenjiagua	1 100~1 300 m: >80% 1 200~1 300 m: >50%	>35°: <20% 15~35°: >50%	25%~40%	15%~50%	>5%
V	毛堡则 Maobaoze	1 200~1 400 m: >80% 1 300~1 400 m: >50%	>35°: >20% 15~35°: >50%	>70%	<15%	>5%
VI	尚合年 Shanghenian	1 200~1 400 m: >80% 1 300~1 400 m: >50%	>35°: <20% 15~35°: >50%	>70%	<15%	>5%

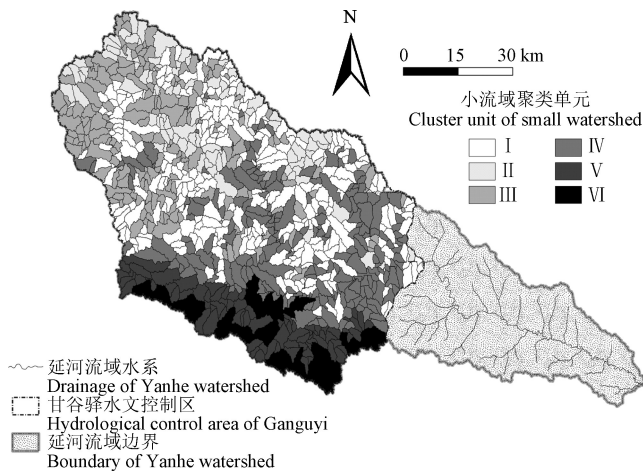


图3 延河流域小流域聚类图

Fig.3 Cluster map of small watersheds in Yanhe River basin

2 结果与分析

2.1 植被特征

依据中国植被分类系统和陕西植被分类系统, 结合研究区植被结构特征, 现阶段延河流域 6 个典型小流域主要的植被类型有 30 个植物群系, 包括 6 个人工乔木林群系、2 个人工灌木林群系、3 个自然乔木林群系、6 个自然灌木林群系和 13 个半灌木草本群系。南部植被类型

以自然乔、灌植物群系分布最广, 主要为辽东栎、侧柏、三角槭、丁香和狼牙刺等群系, 其中以辽东栎群系分布最为广泛, 占各小流域植被面积的 60%以上; 中部植被类型以人工刺槐群系和铁杆蒿群系为主, 二者占各流域植被面积的 50%以上, 其次白羊草、长芒草等草本植物群系, 以及沙棘、柠条和狼牙刺等灌木植物群系在各小流域也分布较广; 而北部以铁杆蒿群系为主, 其次还广泛分布着刺槐、沙棘、白羊草、芨蒿、长芒草和茵陈蒿等群系。

现阶段延河流域南部的 2 个小流域植被盖度主要分布在大于 75%的盖度等级, 约占流域面积的 60%以上; 自然乔木植物群系盖度均以 75%以上为主, 灌木植物群系盖度在 45%以上, 自然演替中后期的铁杆蒿、白羊草和芨蒿等草本植物群系盖度主要以 60%~75%为主, 而演替中前期的茵陈蒿和达乌里胡枝子等草本植物群系的盖度以 45%~60%为主。中部 2 个小流域植被盖度主要分布在 45%~75%之间, 占流域总面积的 80%以上; 所有草本植物群系和灌木植物群系盖度主要分布在 45%~60%之间, 人工刺槐群系的盖度主要分布在 45%~75%之间。北部的 2 个小流域植被盖度主要分布在 30%~60%之间, 占流域总面积的 80%以上, 其中 45%~60%盖度等级分布最为广泛, 占流域面积的 60%以上, 各植物群系在 30%~45%盖度等级的分布比例比中部略高(表 2)。

表 2 典型小流域不同盖度等级的面积分布特征

Table 2 Area distribution characteristics of different coverage levels in typical small watersheds

流域 Watersheds	<30%		30%~45%		>45%~60%		>60%~75%		>75%	
	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%	面积 Area/hm ²	比例 Proportion/%
石子湾 Shiziwān	0	0.5	96.44	16.8	331.44	60.9	219.56	19.4	60.63	2.4
高家沟 Gaojiagou	1.44	0.5	129.56	26.2	646.19	63.7	236.44	9.1	44.31	0.5
陈家瓜 Chenjiagua	9.06	0.1	406.75	12.0	480.13	51.0	67.75	29.0	8.38	7.8
张家河 Zhangjiahe	11.13	0.1	645.44	12.3	1 567.69	61.1	224.69	22.4	12.44	4.2
毛堡则 Maobaoze	0.13	0	85.06	9.1	97.94	10.5	183.63	19.7	564.31	60.6
尚合年 Shanghenian	0	0	8.69	1.1	47.69	6.1	90.00	11.5	638.94	81.4

2.2 降雨特征

2013 年延河流域在 5—10 月份的侵蚀性降雨量主要集中在 7—9 月, 占全年侵蚀性降雨量的 85%~92.5%; 7 月份侵蚀性降雨最大, 其中宝塔区(766.8 mm)、延川县(654 mm)与志丹县(502.9 mm)的侵蚀性降雨量是往年 7 月平均降雨量的 2~5 倍, 发生在 7 月 12 日延川县的最大 1 日侵蚀

性降雨量最高达 122.4 mm。大雨共发生 79 站次, 其中 7 月发生 35 站次, 占大雨站次的 44.3%。暴雨(≥50.0 mm)共发生 39 站次, 7 月共 31 站次, 占暴雨站次的 79.5%。7 月份延河流域共出现 5 次历时长、强度大、波及范围广的强降雨过程, 超过百年一遇的标准, 暴雨中心位于延安市宝塔区^[19-20], 5 次暴雨情况及 7 月份降雨等值线图见表 3 和图 4。

表 3 延河流域及附近各县区 2013 年 7 月 5 次暴雨情况

Table 3 Five rainstorms on July 2013 in Yanhe River basin and nearby counties

暴雨次数 Rainstorm	起止时间 Period	暴雨日数 Days	各县区降雨量 Rainfall in counties/mm							
			宝塔区 Baota	安塞县 Ansai	延长县 Yanchang	靖边县 Jingbian	志丹县 Zhidan	子长县 Zichang	延川县 Yanchuan	甘泉县 Ganquan
1	3—4 日	2 日	104.0	72.0	0	52.0	45.0	75.0	70.0	26.9
2	8—16 日	9 日	386.7	298.5	216.7	244.4	330.3	220.2	403	235.0
3	18—19 日	2 日	98.0	15.0	0	20.0	25.0	17.0	35.0	44.0
4	22—23 日	2 日	71.5	31.5	39.5	18.0	45.5	21.8	43.9	117.6
5	25—27 日	3 日	92.3	94.7	69.1	108.6	86.8	85.0	78.7	49.3
合计 Total		18 日	752.5	511.7	325.3	443.0	532.6	419.0	630.6	472.8

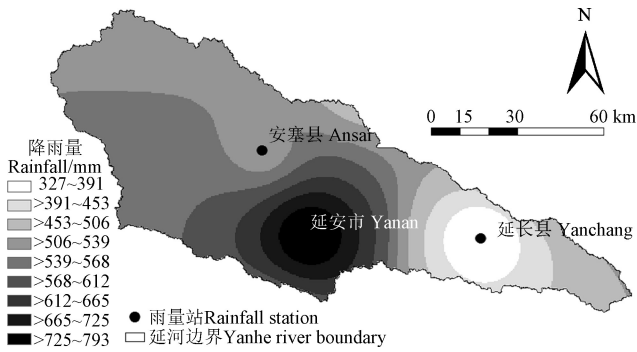
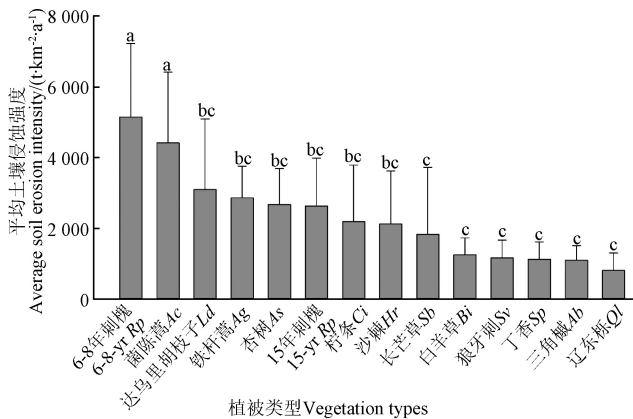


图 4 延河流域 2013 年 7 月降雨等值线图

Fig.4 Rainfall contour map on July 2013 in Yanhe River basin

2.3 土壤侵蚀特征

2013 年自然乔木林植被（辽东栎和三角槭群系）的减蚀能力最强，平均侵蚀强度小于黄土高原地区的允许土壤流失量（1 000 t/km²）；其次为自然灌木植被，平均侵蚀强度在 1 118.1~1 161.2 t/km² 之间；再次为演替中后期的草本植被（如长芒草和白羊草群系），平均侵蚀强度在 1 245.2~1 827.8 t/km² 之间；而演替中前期的草本植被减蚀能力最弱（如茵陈蒿和达乌里胡枝子群系），平均侵蚀强度在 3 087.6~4 408.4 t/km² 之间。在人工植被中，灌木林比乔木林具有相对较强的减蚀能力，分别为 2 119.7~2 183.9 t/km² 和 2 625.7~5 149.6 t/km²，尤其是 6~8 年人工刺槐林，因其造林时间较短，平均郁闭度仅为 30%，且林下草本植被覆盖稀少，平均草本盖度仅为 20%左右，土壤侵蚀强度达到 5 141.6 t/km²（图 5）。



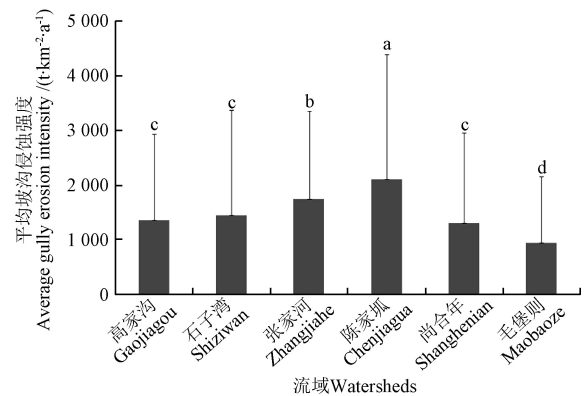
Note: Different lowercase letters indicate the difference between the different vegetation types in $P < 0.05$ level. Rp: *Robinia pseudoacacia*; Ac: *Artemisia capillaries*; Ld: *Lespedeza davurica*; Ag: *Artemisia gmelinii*; As: *Artemisia sibirica*; Ci: *Caragana intermedia*; Hr: *Hippophae rhamnoides*; Sb: *Stipa bungeana*; Bi: *Bothriochloa ischaemum*; Sv: *Sophora vicifolia*; Sp: *Syringa pекinensis*; Ab: *Acer buergerianum*; Ql: *Quercus liaotungensis*; yr: Year

图 5 不同植被类型 2013 年平均土壤侵蚀强度

Fig.5 Average soil erosion intensity of different vegetation types in 2013

2013 年延河中部的陈家坨和张家河小流域坡面土壤侵蚀强度分别为 2 109.5 和 1 746.8 t/km²，显著大于其他 4 个小流域 ($P < 0.05$)，且这 2 个小流域之间也呈显著性差异 ($P < 0.05$)；在其他 4 个小流域中，尚合年、高家沟、石子湾小流域坡面土壤侵蚀强度（分别为 1 312.9、1 362.1、1 457.4 t/km²）显著大于毛堡则小流域

(956.5 t/km²) ($P < 0.05$)（图 6）。以上 6 个小流域的侵蚀强度均小于 2 500 t/km²，属轻度侵蚀等级，特别是毛堡则小流域，坡面侵蚀强度在 1 000 t/km² 以下属微度侵蚀。虽然南部和北部的 4 个小流域平均坡面土壤侵蚀强度均表现出较小的特征，但其减蚀的原因不同：南部小流域可能是由于大面积分布的天然次生林植被特别是辽东栎群系具有较强的减蚀能力所致；而北部小流域一方面由于离 2013 年延河流域暴雨中心较远，降雨量和降雨强度相对较小，另一方面在调查发现北部小流域内草本植物群系坡面的土壤生物结皮分布广泛，可增强地表糙率、减小坡面径流和促进水分入渗，具有较强的减蚀能力。



注：图中不同字母代表不同小流域之间存在显著差异性 ($P < 0.05$)。 Note: Different letters represent significant differences between different small watersheds at 0.05 level.

图 6 延河典型小流域 2013 年植被坡面平均土壤侵蚀强度 Fig.6 Average soil erosion intensity of vegetation slopes in 2013 in typical small watersheds of Yanhe River basin

然而，在 2013 年暴雨条件下，延河流域发生了大范围的小面积浅层滑坡。距离暴雨中心（延安市）较近的南部和中部的各小流域内单位面积的滑坡数量与频率明显多于北部的小流域。南部 2 个小流域的平均滑坡侵蚀强度达 7 290.3 和 7 424.9 t/km²，平均侵蚀强度为 7 357.7 t/km²；中部 2 个小流域为 3 701.1 和 3 712.8 t/km²，而北部 2 个小流域仅为 1 391.9 和 1 964.1 t/km²（表 4）。在野外调查中发现，滑坡几乎全部发生在坡度陡峭的沟坡，虽然坡面上植被覆盖良好，多为天然次生林辽东栎和三角槭群系坡面，植被乔灌草垂直结构完备，但几乎在所有沟坡上均有滑坡侵蚀的发生。

2.4 典型小流域侵蚀产沙特征

依据小流域坡面侵蚀、滑坡侵蚀量与小流域沟道泥沙淤积量，计算得到北部的石子湾和高家沟小流域侵蚀产沙强度分别为 2 326.7 和 2 763.6 t/km²，中部的张家河和陈家坨小流域分别为 5 108.7 和 5 407.9 t/km²，而南部的毛堡则和尚合年小流域分别达到 7 656.5 和 7 774.5 t/km²（表 5）。滑坡侵蚀量占各小流域侵蚀总量的 49.0%~88.5%，特别是在毛堡则和尚合年分别高达 88.5%和 85.0%；有 6.4%~18.3%的侵蚀量淤积在沟道里，其中北部的高家沟和石子湾较大，分别为 16.9%和 18.3%，中部 2 个流域为 6.4%和 6.9%，南部 2 个流域为 8.7%和 9.6%。

表4 延河流域典型小流域2013年滑坡侵蚀特征

Table 4 Characteristics of landslide erosion in 2013 in typical small watersheds of Yanhe River basin

流域 Watersheds	调查流域面积 Drainage area/km ²	滑坡数 Landslide number	滑坡频率 Landslide frequency/ (处·km ⁻²)	滑坡侵蚀量 Landslide erosion/t	平均滑坡侵蚀强度 Average landslide erosion intensity/(t·km ⁻²)
毛堡则 Maobaoze	9.4	97	10.32	69794.9	7424.9
尚合年 Shanghenian	3.6	36	10.00	26245.2	7290.3
张家河 Zhangjiahe	10.8	49	4.55	39986.7	3712.8
陈家瓜 Chenjiagua	4.9	25	5.10	18135.3	3701.1
高家沟 Gaojiagou	9.5	28	2.95	53640.7	1964.1
石子湾 Shiziwang	10.4	25	2.40	14476.3	1391.9

表5 延河典型小流域2013年侵蚀产沙特征

Table 5 Characteristics of erosion and sediment yield in typical small watersheds of Yanhe River basin in 2013

小流域 Watersheds	流域面积 Drainage area/km ²	坡面侵蚀强度 Slope erosion intensity/(t·km ⁻²)	滑坡侵蚀强度 Landslide erosion intensity/(t·km ⁻²)	总侵蚀量 Total erosion amount/t	淤积深 Siltation depth/cm	沟道面积 Channel area/km ²	淤积量 Deposition yield/t	侵蚀产沙量 Erosion sediment yield/t	侵蚀产沙强度 Sediment yield intensity/(t·km ⁻²)
高家沟 Gaojiagou	24.7	1 362.3	1 964.1	81 999.6	0.4	2.6	13 875.0	68 124.6	2 763.6
石子湾 Shizigou	10.7	1 457.5	1 391.9	30 377.2	0.4	1.2	5 573.6	24 803.6	2 326.7
张家河 Zhangjiahe	10.6	1 746.8	3 712.8	57 752.1	0.3	1.1	3 715.7	54 036.4	5 108.3
陈家瓜 Chenjiagua	11.3	2 109.5	3 701.1	65 615.8	0.3	1.1	4 547.6	61 068.2	5 407.8
毛堡则 Maobaoze	9.3	956.5	7 424.9	78 005.8	0.5	1.0	6 747.8	71 257.9	7 656.5
尚合年 Shanghenian	7.9	1 312.9	7 290.3	67 740.3	0.6	0.8	6 527.0	61 213.3	7 774.4

2.5 延河流域的侵蚀产沙特征

依据延河流域主河道8个河段(图2)的泥沙淤积量的估算结果(表6),杏子河流域河段和延安-甘谷驿段的主河道泥沙淤积深度均大于2 cm,泥沙淤积量分别达145.2和71.5万t,而延河上游镰刀湾以上河段的河道淤积深约0.8 cm,泥沙淤积量约13.2万t,其他河段的淤积深介于1.3~1.6 cm之间,泥沙淤积量约18.1~57.9万t,得到2013年延河流域主河道总淤积量约0.0403亿t。依据6个典型小流域的侵蚀产沙量及各自聚类的小流域面积,得到延河流域在2013年特大暴雨条件下总侵蚀产沙量约0.268亿t(表7)。可见,甘谷驿水文站2013年输沙量计算值为0.228亿t,而实测输沙量为0.243亿t^[21],计算值比实测值小0.015亿t,相对误差6.2%,说明本研究的估算结果具有可靠性。

表6 延河流域2013年主河道各河段的泥沙淤积量

Table 6 Sediment deposition yield in each river sections of main channel in 2013 of Yanhe River basin

单元号 Unit number	面积 Area/km ²	淤积深 Siltation depth/cm	淤积量 Deposition yield/万t
1	12.1	0.8	13.2
2	10.3	1.3	18.1
3	53.4	2.0	145.2
4	10.8	1.6	23.6
5	28.4	1.5	57.9
6	27.7	1.4	52.8
7	22.9	2.3	71.5
8	11.1	1.4	21.1
合计 Total			403.4

注:表6中的单元号与图2中的河道分段相对应。

Notes: Unit number in table 6 corresponds to the number of river section in Fig.2.

表7 延河流域2013年不同类别小流域的侵蚀产沙量

Table 7 Erosion sediment yield of different categories of small watersheds in 2013 in Yanhe River basin

小流域类别 Small watershed category	侵蚀产沙强度 Sediment yield intensity/ (t·km ⁻²)	面积 Area/km ²	占甘谷驿控制区面 积的比例 Proportion in Ganguyi control area/%	产沙量 Sediment yield/亿t
I	2 326.7	1 765.9	29.8	0.041
II	2 763.6	647.9	10.9	0.018
III	5 108.3	1 149.4	19.4	0.059
IV	5 407.9	1 373.5	23.2	0.074
V	7 656.5	549.6	9.3	0.042
VI	7 774.4	440.8	7.4	0.034
合计 Total	4 521.8	5 926.9	100.0	0.268

2013年延河流域不同类型小流域侵蚀产沙强度在2 326.7~7 774.4 t/km²之间,平均为4 521.8 t/km²(表6)。然而,侵蚀产沙强度在5 000~8 000 t/km²的强度侵蚀面积(3 513.2 km²)占甘谷驿控制区的59.3%,其中区域位于延河流域南部西川河以南的洛平川、烧房砭、金盆湾和南川河的龙寺和三十里铺等地(16.7%)侵蚀最为严重,侵蚀产沙强度在7 500~7 800 t/km²之间;分布在西川河以北的砖窑湾和枣园等地,杏子河上游的大路沟、张渠和王南沟等地,延河上游化子坪以上段和安塞-沿河湾段,蟠龙川的蟠龙、青化砭和周家湾以及张川河等地的侵蚀产沙强度在5 000~5 500 t/km²之间;这是由于这些区域距离暴雨中心近,滑坡侵蚀严重所致。而甘谷驿控制区其余的40.7%的面积侵蚀产沙强度在2 300~2 800 t/km²之间(图7)。

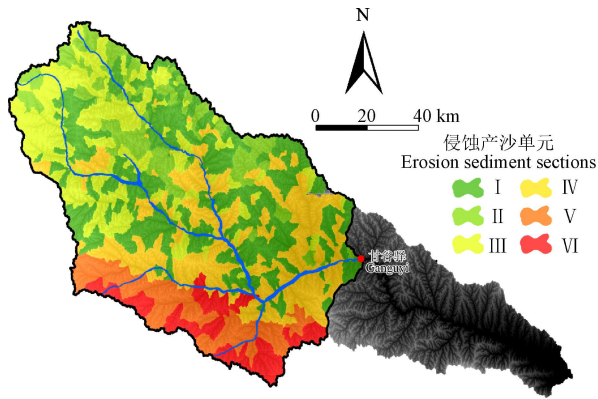


图 7 延河流域甘谷驿控制区 2013 年侵蚀产沙的空间分布
Fig.7 Spatial distribution of erosion sediment yield in 2013 in Ganguyi control area of Yanhe River basin

3 讨论

本研究表明现阶段延河流域的植被盖度在北部主要分布在 30%~60%之间,其中植被盖度为 45%~60%的面积占流域面积的 50%~60%;在中部主要分布在 45%~75%之间,其中植被盖度为 45%~60%与 60%~75%的面积分别占流域面积的 45%~60%和 20%~30%;而南部的植被盖度大于 45%,其中大于 75%的面积占流域面积的 60%~80%。延河流域 2013 年 6 个小流域坡面平均土壤侵蚀强度均小于 2 500 t/km²,特别是南部的 2 个小流域平均为 1 134.7 t/km²;在实地调查中也发现,坡面上很难发现有小细沟和浅沟侵蚀的发生。这足以说明,经过十余年的退耕还林(草)工程的实施,延河流域的植被恢复效果明显,即使在 2013 年的极端暴雨年份,也能有效地抵御坡面土壤侵蚀的发生。然而,暴雨引发了大规模的滑坡侵蚀,在距离暴雨中心较近的南部 2 个小流域,平均每平方千米的滑坡数量达到 10 处,侵蚀模数高达 7 357.7 t/km²,而距离暴雨中心较远的北部 2 个小流域发生频率(2~3 处/km²)与侵蚀模数(1 678.1 t/km²)明显减小。这是由于前期降水量是诱发重力侵蚀的重要参数,并且随着前期降雨时间的增长,后期诱发滑坡、崩塌等重力侵蚀所需的降雨量将减少,同时,降雨量越大,持续时间越长,小型重力侵蚀发生的几率越大^[22-24]。对 1960—2006 年陕西黄土高原地区滑坡发生的降雨统计分析表明:当日平均降水量达到 20 mm 左右,降雨日数为 5 d 左右,10 mm 以上日数 2 d 左右,25 mm 以上日数约 1 d,这些条件满足之一时,滑坡就开始发生^[25-26]。在 2013 年 7 月 3—23 日期间发生的暴雨日最多且间隔时间最短的持续强降雨过程,远远大于这些滑坡发生的降水条件,势必引发大范围的滑坡发生。

同时,植被也会由于根系的纵向分崩离析作用促进崩塌、滑坡的发生^[27]。在对 2013 年子午岭林区发生的浅层滑坡侵蚀与植被关系的研究表明,不同类型滑坡侵蚀深度与其对应植被类型的根系深度相近,植被及其根系会加剧滑坡侵蚀的发生^[28]。在本研究中,延河流域南部的小流域坡面植被类型多以天然乔木林为主,植被乔灌草结构完整,且植被盖度较高,但滑坡侵蚀严重,而北

部小流域内发生滑坡的坡面植被多为草本植被覆盖,植被盖度相对较低,且基本无植被垂直结构,相比南部小流域,滑坡侵蚀较小。另外, Liu 等^[29]在延安羊圈沟流域的研究也发现,随着恢复年限的增加,植被盖度显著增大,但坡面径流系数也升高,径流量也随之增加,进而增强了流域的沟谷侵蚀。这是因为梁峁坡耕地大面积退耕后,虽然耕作土逐渐紧实,土壤抗蚀性增强,但入渗率降低,梁峁坡地产流量增加,梁峁坡地流入沟谷的径流量加大,会加剧沟谷地的冲沟侵蚀和重力侵蚀^[30]。

4 结论

目前坡面良好的植被覆盖能有效抵御暴雨侵蚀,在 2013 年极端暴雨条件下坡面土壤侵蚀强度基本 < 2 500 t/km²,但滑坡重力侵蚀占主导地位,特别是距暴雨中心较近的流域可达 7 300 t/km²左右。因此,加强沟间地雨水蓄排措施,减轻坡面径流下沟对沟坡重力侵蚀的影响,是土壤侵蚀研究与防治中值得重视的问题。

[参 考 文 献]

- [1] Tian J L. Restoring the eco-environment in conformity natural law—Some considerations on the vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003, 17(2): 101—106.
- [2] 景可, 郑粉莉. 黄土高原植被建设的经验教训与前景分析[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 25—27.
Jing Ke, Zheng Fenli. Experiential lesson and perspective of vegetation construction on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120—124.
Zhang Jintun. Theory and techniques of vegetation restoration and construction on Loess Plateau, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 120—124. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王娟, 卓静. 基于 RS 和 GIS 的陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 220—229.
Wang Juan, Zhuo Jing. Quantitative assessment of soil erosion in areas under Grain for Green project in Loess Plateau of Northern Shaanxi province based on GIS and RS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 220—229. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵文启, 刘宇, 罗明良, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 89—94.
Zhao Wenqi, Liu Yu, Luo Mingliang, et al. Effect of revegetation on soil erosion in small watershed of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 89—94. (in Chinese with English abstract)
- [6] Li S, Liang W, Fu B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1032—1039.
- [7] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 1—11.

- [8] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38–41.
- [9] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287–295.
- [10] 吴胜德. 延河流域水保减沙效益及对水库设计的影响分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
Wu Shengde. Analysis of Sediment Reduction after Soil and Water Conservation in Yanhe Watershed and Its Effect on Reservoir Design[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李传哲, 王浩, 于福亮, 等. 延河流域水土保持对径流泥沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 1–8.
Li Chuazhe, Wang Hao, Yu Fuliang, et al. Impact of soil and water conservation on runoff and sediment in Yanhe River Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 1–8. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王飞, 穆兴民, 焦菊英, 等. 基于含沙量分段的人类活动对延河水沙变化的影响分析[J]. *泥沙研究*, 2007(4): 8–13.
Wang Fei, Mu Xingmin, Jiao Juying, et al. Impact of human activities on runoff and sediment change of Yanhe River based on the periods divided by sediment concentration[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(4): 8–13. (in Chinese with English abstract)
- [13] 冉大川, 姚文艺, 吴永红, 等. 延河流域 1997–2006 年林草植被减洪减沙效应分析[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 1–9.
Ran Dachuan, Yao Wenyi, Wu Yonghong, et al. Effect of forest-grass vegetation on reducing flood and sediment from 1997 to 2006 in Yanhe basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(1): 1–9. (in Chinese with English abstract)
- [14] 卫建军, 李新平, 杨勤科, 等. 基于遥感的土地利用与退耕还林时空变化研究: 以延河流域下游地区为例[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(2): 87–90.
Wei Jianjun, Li Xinping, Yang Qinke, et al. Land use changes based on CBERS data in lower reaches of yanhe river in the loess plateau of China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 87–90. (in Chinese with English abstract)
- [15] 朱恒峰, 赵文武, 康慕谊, 等. 延河流域土地利用格局时空变化与驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 17–22.
Zhu Hengfeng, Zhao Wenwu, Kang MUYI, et al. Spatial-Temporal changes of land use pattern and driving factors analysis in Yanhe River Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(8): 17–22. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6–11.
Xie Yu, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 6–11. (in Chinese with English abstract)
- [17] 黄炎和, 陈明华, 黄鑫全. 土壤侵蚀量的标签定位测定法初探[J]. *福建水土保持*, 1998(2): 51–53.
- [18] 中国地质调查局. 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范 (1:50000)[S]. 2008, DD2008-02.
- [19] 曹斌挺, 焦菊英, 王志杰, 等. 2013 年延河流域特大暴雨下的滑坡特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 103–109.
Cao Binting, Jiao Juying, Wang Zhijie, et al. Characteristics of landslide under the extreme rainstorm in 2013 in the Yanhe basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 103–109. (in Chinese with English abstract)
- [20] 魏艳红, 王志杰, 何忠, 等. 延河流域 2013 年 7 月连续暴雨下淤地坝毁坏情况调查与评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 250–255.
Wei Yanhong, Wang Zhijie, He Zhong, et al. Investigation and evaluation on check dams damaged condition under continuous rainstorm in Yanhe river basin in July 2013[J]. *Bulletion of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 250–255. (in Chinese with English abstract)
- [21] 水利部黄河水利委员会[EB/OL]. 黄河泥沙公报, 2013. <http://www.yellowriver.gov.cn/nishagonggao>.
- [22] Jordi C Josem. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain[J]. *Geomorphology*, 1999, 30: 79–93.
- [23] 杨吉山, 姚文艺, 马三保, 等. 黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 5–8.
Yang Jishan, Yao Wenyi, Ma Sanbao, et al. Analysis on the small gravitational erosion factors in gully region of the loess plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 5–8. (in Chinese with English abstract)
- [24] Sasaki Y, Fujj A, Asai K. Soil creep process and its role in debris slide generation-field measurements on the northside of Tsukuba Mountain in Japan[J]. *Engineering Geology*, 2000, 56: 163–183.
- [25] 李明, 高维英, 杜继稳. 诱发陕西黄土高原地质灾害降水因子分析[J]. *陕西气象*, 2009(5): 1–5.
- [26] 张雅斌, 杜继稳, 蔡蕊, 等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. *灾害学*, 2011, 26(3): 28–34.
Zhang Yabin, Du Jiwen, Cairui, et al. Meticulous meteorological forecasting and alarming for geological hazard in Shaanxi Province[J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(3): 28–34. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙尚海, 张淑芝, 张丰. 中沟流域的重力侵蚀及其防治[J]. *中国水土保持*, 1995, 9: 25–27.
Sun Shanghai, Zhang Shuzhi, Zhang Feng. Gravitational erosion and its prevention measures in Zhonggou watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1995, 9: 25–27. (in Chinese with English abstract)
- [28] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系—以富县“7·21”特大暴雨为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4635–4643.
Han Yong, Zheng Fenli, Xu Ximeng, et al. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4635–4643. (in Chinese with English abstract)
- [29] Liu Y, Fu B, Lü Y, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 404–414.
- [30] 冯明义, Walling D E, 张信宝, 等. 黄土丘陵区小流域侵蚀产沙对坡耕地退耕响应的 ^{137}Cs 法[J]. *科学通报*, 2003, 48(13): 1452–1457.

Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe Watershed based on field measurement

Jiao Juying^{1,2}, Wang Zhijie^{2,3}, Wei Yanhong², Su Yuan^{1,3}, Cao Binting¹, Li Yujin¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at whether the present erosion environment could withstand the test and possible problems under the extreme rainstorm events on the Loess Plateau, the characteristics of erosion sediment yield at different scales in 2013 with extreme rainstorm events were analyzed based on the vegetation investigation and soil erosion monitoring in Yanhe River Basin. The average soil erosion intensity was $< 1\ 000\ \text{t}/\text{km}^2$ for the natural arbor vegetation (*Quercus liaotungensis* and *Acer buergerianum*), from 1 118.1 to 1 161.2 t/km^2 for the natural shrub vegetation, from 1 245.2 to 1 827.8 t/km^2 for the herbaceous vegetation in the middle-late stage of succession, while from 3 087.6 to 4 408.4 t/km^2 for the herbaceous vegetation in the early-middle stage of succession. In the artificial vegetation, the ability of reducing soil erosion for artificial shrub vegetation (2 119.7-2 183.9 t/km^2) was larger than the artificial arbor vegetation (2 625.7-5 149.6 t/km^2). In particular, the average coverage of the 6-8 years of artificial *Robinia pseudoacacia* was only 30% due to the shorter afforestation time, so the soil erosion intensity reached 5 141.6 t/km^2 . In the condition of the rainstorm in 2013, the average soil erosion intensity of the slopes with good vegetation in all small watersheds was below 2 500 t/km^2 . The erosion intensity was mainly in the category of slight erosion in the small watersheds of the southern and northern areas, and mainly in the category of mild and moderate erosion in the small watersheds of the middle area. However, the landslide erosion was dominant, accounting for 49.0%-88.5% of the total erosion in small watersheds. The average landslide erosion intensity reached 7 357.7 t/km^2 in the southern area near the rainstorm center, 3 706.9 t/km^2 in the middle area and 1 678.1 t/km^2 in the northern area. There was 6.4%-18.3% of erosion amount deposited in the channels in different small watersheds. The sediment deposition amount was 13.2×10^4 - $145.2 \times 10^4\ \text{t}$ in different sections of riverbed in the upstream of Ganguyi Hydrological Station in Yanhe River Basin, accounting for 15% of the total erosion sediment yield on average. The intensity of erosion sediment yield ranged from 2 326.7 to 7 774.4 t/km^2 in the controlled area of Ganguyi Hydrological Station, of which the area with erosion sediment intensity of 5000-8000 t/km^2 was 59.3%. In 2013, the calculated value of sediment discharge at the Ganguyi Hydrological Station was $0.228 \times 10^8\ \text{t}$, while the measured sediment discharge was $0.243 \times 10^8\ \text{t}$. By comparison, the calculated value was $0.015 \times 10^8\ \text{t}$ smaller than the measured value with the relative error of 6.2%. Therefore, the results of this research were reliable. At the present stage, the good vegetation cover of the hill slope could control rainstorm erosion effectively. The erosion type of the sediment source of Yanhe Watershed was dominated by gravitational erosion in the condition of rainstorm. Therefore, in the premise of protecting the achievements of the "Grain for Green" project, it should strengthen the storage and drainage measures in the inter-gully to reduce the slope runoff flowing down the gully and prevent gravitational erosion of the gully slope and the gully erosion. Then, it might effectively prevent soil erosion, and promote the realization of beautiful mountain and river in future.

Keywords: soils; erosion; landslides; extreme rainstorm events; vegetation restoration; erosion sediment yield