黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制

刘晓燕^{①*}, 杨胜天^②, 李晓宇^③, 周旭^②, 罗娅^②, 党素珍^④

① 黄河水利委员会, 郑州 450003;

② 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

③ 黄河水文水资源研究院, 郑州 450004;

④ 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003

* E-mail: liuxiaoyan@yrcc.gov.cn

收稿日期: 2015-05-05; 接受日期: 2015-06-25

国家科技支撑计划(批准号: 2012BAB02B05)和国家自然科学基金(批准号: 41301030)资助项目

摘要 2000 年以来, 黄土高原林草植被状况明显改善, 同期黄河水沙也明显减少。本文基于 20 世纪 70 年代末、90 年代末、2010 年和 2013 年卫星遥感影像, 引入易侵蚀面积、林草地比例、林草地植被盖度和林草植被覆盖率等概念, 并结合实地调查, 分析了 20 世纪 70 年代以来黄河中游多沙区林草植被的规模、盖度和结构变化; 引入产沙系数、径流系数和产洪系数等概念, 在流域层面上剖析了黄土丘陵沟壑区林草植被覆盖状况与产沙、产洪和产水的响应关系, 揭示了研究区近年水沙大幅减少的原因。研究认为, 与 20 世纪 70 年代末相比, 1998 年以前林草植被变化不大, 但 1998~2013 年林草植被覆盖率却由 11%~25% 增加到 35%~55%, 该改善过程恰是植被变化影响产沙的敏感阶段; 高含沙洪水仍然是未来黄土高原支流的常遇洪水, 但含沙量会降低。

关键词黄土高原
多沙区
林草植被
产流产沙
影响机制

1 研究背景

黄河天然来沙量 16 亿吨(陕县, 1919~1960 年), 90% 来自河口镇至潼关区间(以下简称河潼间); 天然径流量 $560 \times 10^8 \text{ m}^3$ (花园口, 1919~1975 年), 其中的 1/3 来自河潼间。不过, 2003~2013 年, 在降雨略偏丰情况下, 潼关实测年来沙量只有 2.6 亿吨、其中河潼间偏少 85%, 花园口站天然径流量只有 $488 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、其中河潼间偏少 40%; 2000 年以来, 河潼间绝大部分地区林草植被恢复效果非常显著。在此背景下, 定量阐明黄土高原主要产沙区的林草植被变化程度, 科学

评价其对区域产流产沙的影响, 成为目前人们关注的热点问题。

林草植被变化是否对近年来沙锐减有减少作用, 核心在于林草的面积、盖度和结构是否较天然时期发生了改变。然而, 统计渠道获取的林草地面积只是人工植树种草的成果, 且无林草盖度信息。利用遥感技术, 2000 年以来已有不少文献对黄土高原的植被变化进行了研究^[1~4]。不过, 现有研究采用的植被盖度均没有剔除耕地上农作物植被的影响; 在大空间尺度上分析黄土高原植被变化时, 采用的遥感影像空间分辨率偏低。

引用格式: 刘晓燕, 杨胜天, 李晓宇, 等. 黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1052~1059
Liu X Y, Yang S T, Li X Y, et al. The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1052~1059, doi: 10.1360/N092015-00028

大量研究表明, 植被主要通过叶茎截留降雨并降低降雨侵蚀力、根系和枯落层增加降雨入渗、增大坡面径流阻力、提高地表抗侵蚀能力、削减洪峰和洪量、消减径流下沟等实现减水减沙^[5~14]。不过, 现有研究主要是在坡面径流小区或次生林区开展的, 所提出的林草盖度与产流产沙的关系, 或面临从小区向流域尺度推广的转换困难, 或难以推广至以草本和灌木为主的严重水土流失区。

在黄土高原的水流含沙量方面, 许炯心^[15]分析了地表物质组成与含沙量的关系, 王兴奎^[16]研究了黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程, 廖建华^[17]注意到高含沙水流多发生在降雨量 200~600 mm 和 NDVI 值为 0.115~0.125 的范围内。不过, 如何在大空间尺度上定量评价林草植被变化对水流含沙量影响, 目前仍鲜见报道。

基于 20 世纪 50 年代以来不同时期的实测水文数据和 70 年代以来的卫星遥感影像, 本文将分析黄河中游多沙区林草植被的变化程度, 并试图在流域尺度上揭示以灌草植被为主的林草植被变化对产流产沙的影响机制。

2 研究区及基础数据

2.1 研究区概况

本文将黄河中游河口镇至潼关区间作为研究范

围(图 1), 并重点关注其多沙区, 包括河口镇至龙门区间(以下简称河龙间)、北洛河上游(指刘家河以上)、渭河北道以上和泾河景村以上, 面积 $20.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 天然时期来沙量为 14.65 亿吨, 占黄河龙门、汾河河津、北洛河状头、泾河张家山和渭河咸阳等五站以上天然来沙的 86.5%。

研究区主要涉及黄土丘陵区、风沙(盖沙)区和黄土高原区等三个类型区, 其中, 风沙(盖沙)区主要分布在无定河上游和秃尾河上游, 天然来沙约 0.36 亿吨; 黄土高原区主要分布在泾河流域中部, 天然来沙约 0.8 亿吨。黄土丘陵区面积最大, 天然来沙最多, 按地表物质组成为黄土区和砒砂岩区(主要位于皇甫川流域)。研究区秦岭、六盘山和吕梁山一带还分布有石山区, 水土流失轻微, 故研究中将相关数据剔除。

2.2 林草植被数据

为科学和全面认识林草面积、盖度和结构较天然时期的变化, 需对相关概念进行界定。定义“易侵蚀面积(A_e, km^2)”为流域内剔除河川地、石山区和建设用地后的土地面积; 易侵蚀地剔除耕地和建设用地即为“林草地”, 其植被覆盖情况用“林草地植被盖度”表示; “林草地比例”则为流域内林草地占易侵蚀面积的比例。

采用的遥感影像有四个时段: 70 年代末(MSS, 空间分辨率 56 m, 主要为 1977 年和 1978 年影像)、20

图 1 研究区示意图

世纪 90 年代末(TM, 空间分辨率 30 m, 主要为 1998 年影像)、2010 年和 2013 年(HJ, 空间分辨率 30 m). 基于遥感影像, 并结合实地调查, 进行土地利用类型分析, 可得到各支流的易侵蚀面积、林草地面积和林草地比例. 提取植被归一化指数(NDVI), 获取植被盖度信息, 并将耕地和建设用地的覆盖度赋值为 0, 可计算出林草地的平均植被盖度.

2.3 降雨和水沙数据

考虑到黄土高原量级较小的降雨并不产流产沙^[5], 统计了 1966~2013 年各水文站控制区日降雨大于 25 mm 的年降雨总量, 用 P_{25} 表示.

基于水文站实测输沙量, 还原坝库拦沙量, 得到各水文站控制区域的产沙量(W_s , 单位吨). 基于实测径流量, 还原用水和坝库蓄变量, 得到流域的产水量(W , 单位 m^3).

引入“产沙系数”概念, 它是指流域内单位降雨在单位面积上的产沙量, 单位为 $t/km^2 mm$, 计算公式为:

$$S_i = \frac{W_s}{A_e} \times \frac{1}{P_{25}}. \quad (1)$$

本文采用的“径流系数”计算公式为:

$$W_i = \frac{W}{A} \times \frac{1}{P_{25}}, \quad (2)$$

式中 A 为流域面积, 单位 km^2 . 将式中的产水量换为汛期径流量, 即得到产洪系数.

3 近 30 余年林草植被变化分析

3.1 林草地的面积与盖度

基于 70 年代末、90 年代末和 2010 年遥感影像, 得到各区不同时期的林草地比例见图 2, 其中“河龙间西北片”指皇甫川~孤山川~窟野河~秃尾河下游一带, “延安市北部”指清涧河、延河和北洛河上游一带, “马莲河上游”指庆阳和贾桥以上地区, “泾河残塬区”指毛家河、洪河和泾川以上地区, “泾河高塬区”指景村以上的其它地区, 下同.

由图 2 可见, 与 70 年代末相比, 林草地比例增加最多的是延安市北部地区, 2000 年以后的增幅达 25%~47%, 这与延安市 1999 年以来坚定执行国家退

耕还林政策密切相关; 其次是无定河下游和佳芦河, 增幅近 20%. 不过, 渭河咸阳以上、泾河残塬区和河龙间山西片的林草地比例甚至明显减少, 这与当地农业人口密度过大有关. 由于河龙间西北片和风沙区原本耕地很少, 因此, 过去 30 余年, 尽管人们一直在植树造林, 但其林草地比例变化很小.

从图 3 可见, 20 世纪 70 年代以来, 研究区的林草地植被盖度总体处于不断改善的过程中. 不过, 1998 年以前, 无定河~清涧河~延河~北洛河上游~马莲河上游一带以及渭河上中游植被盖度的增加幅度很小, 其中秦岭、六盘山和子午岭等林区周边的林草植被甚至明显退化(图 4). 1998 年以来, 各区林草地植被盖度均明显改善, 改善程度最小的是泾河上中游地区; 至 2013 年, 除河龙间西北片和风沙区、以及马莲河上游地区的林草地植被盖度仍只有 40%~50%外, 其它地区的林草地植被盖度均达 60%以上.

3.2 林草植被覆盖率

为综合反映各流域的林草规模和质量状况, 引入“林草植被覆盖率($V_e V_e$, %)”, 它是某流域内林草地比例与其林草地植被盖度的乘积, 其物理意义是流域内林草叶茎正投影面积占其易侵蚀面积的比例, 反映了易侵蚀土地被林草保护的程

度. 由图 5 可见, 与 20 世纪 70 年代末相比, 2013 年河龙间黄河以西地区和北洛河上游林草植被覆盖率增大了 115%~195%, 显示林草综合状况改善非常明显; 河龙间黄河以东地区和泾河流域增大 35%~51%; 渭河咸阳以上是林草综合状况改善最小的地区, 其中拓石至咸阳区间甚至仍为负增长.

实地调查和查阅文献了解到, 20 世纪中后期, 秦岭、六盘山和子午岭一带的林线一直处于后退中^[5,18], 耕地规模一直在扩大. 因此, 20 世纪 60 年代以前, 渭河咸阳以上和泾河景村以上的林草植被覆盖率很可能比其 70 年代末更高.

值得注意的是, 尽管近年持续封禁、且降雨转丰, 但受当地气候条件限制, 2010 年以后, 河龙间西北片和风沙区的林草植被改善的幅度明显放缓(图 2、图 3、图 5). 至 2013 年, 该区林草植被覆盖率约 40%.

由图 5 可见, 由于耕地面积偏大, 直至 2013 年, 无定河中下游一带(含佳芦河等小支流)、渭河北道以上、泾河残塬区和马莲河上游等地的易侵蚀土地被林草植被保护的程

图 2 林草地比例变化

图 3 各区林草地盖度变化

图 4 泾河和渭河上游 70 年代末与 90 年代末植被盖度对比

3.3 林草植被结构变化

实地调查了解到, 早年的黄土高原除光山秃岭外, 绿色主要来自人工种植的乔木或灌木植物, 其特点是地表盖度不高、物种单一, 其减沙作用主要靠为栽树而开挖的鱼鳞坑或水平沟. 然而, 近十几年的绿

色主要来自自然修复形成的草灌植被, 其特点是郁闭度高、物种多样、紧贴地表. 不过, 直至 2010 年, 研究区绝大部分地区的非农作物植被仍以草本植物和灌草混合植被为主, 间有零星疏林或经济林, 这种植被格局可能是当地降雨和气温条件的必然产物.

图5 各区间林草植被覆盖率变化

4 林草植被变化的水沙响应机制

4.1 对产水产沙量的影响

为凸显林草植被变化的影响,在研究区选择梯田极少的支流,点绘其不同时期林草植被覆盖率及同期产沙系数之间的关系见图6。由图可见,尽管相同林草覆盖率不同地表土壤的产沙系数存在明显差异,但关系曲线的趋势基本相同:在林草植被覆盖率小于40%~50%的范围内,改善林草植被的减沙效果非常明显;无论地表物质组成如何,只要林草植被覆盖率大于60%~70%,产沙系数都趋于稳定。该结果与前人基于小区观测数据得到的认识定性一致^[5-9],事实上,小区研究时采纳的“林草地植被盖度”与本文采纳的“林草植被覆盖率”内涵相近,均为易侵蚀土地被林草叶茎保护的度,区别在于前者反映的是坡面小区尺度上易侵蚀土地被林草覆盖的程度,后者为流域尺度。

需要指出,黄土高原沟壑区的产沙驱动力主要是集中下沟的塬面径流^[19],这与黄土丘陵区相差很大,因此,图6得出的概念不适于此类地区。

将图6与图5对照可见,20世纪90年代末,黄土丘陵区中的多沙区林草植被覆盖率多为11%~25%,2013年河龙间和北洛河上游猛增至35%~55%,该恢复过程恰经历了林草植被变化影响产沙的最敏感阶段,无疑是相应区域同期来沙急剧减少的关键因素:2010~2013年,在降雨偏丰20%~60%和梯田少量增加情况下,还原坝库拦沙量后的两区产沙量分别较20世纪90年代减少55%和77%。渭河北道以上和泾河残塬区虽林草植被状况改善不大,但梯田规模增加2~3倍,故来沙也明显降低。

仍选择图6的黄土区支流,点绘其林草植被覆盖率与径流系数的关系可见(图7):相同干旱指数情况

图6 林草植被变化对流域产沙量的影响

图7 林草植被变化对产水量的影响

下,林草植被覆盖率越大,流域产水越少,二者几乎呈负相关的直线关系;相同林草覆盖率情况下,气候越干旱,不仅产水越少、而且产水对林草植被的变化更敏感。该结论与刘昌明研究成果定性一致^[20]。

林草是通过植被叶茎和枯落物截留降水、根系和枯落物增加降雨入渗而实现减水,而其减沙机制不仅如此,还有降低降雨侵蚀力、增大坡面径流阻力和减轻沟谷侵蚀等途径。因此,在流域层面上,当林草植被覆盖率大于40%~50%以后,若继续增大林草植被覆盖率,减沙幅度将明显放缓,但减水量仍将

增加。

水流是黄土高原重力侵蚀(包括滑坡、崩塌、泻溜和滑塌等)的重要诱因, 但并非全部^[5,6]。因此, 林草虽可通过减少水流侵入土体或楔入黄土节理、减轻沟坡掏刷等减少重力侵蚀, 但无法将其消灭。实地调查看到, 经历了 2013 年 7 月长达 20 天的大范围降雨后, 由于土壤水充分饱和, 即使在子午岭林区也可看到坡面滑塌现象; 在林草植被覆盖率为 59% 的延河, 此类现象更多。由于气候条件制约, 无定河以北地区和马莲河庆阳以上林草植被覆盖率很难超过 50%, 若无大规模梯田拦截坡面径流, 包括重力侵蚀在内的沟谷产沙仍将存在。

雨强也是影响产流产沙的重要因素, 尤其在林草覆盖率小于 40% 情况下; 当林草植被覆盖率达到 50% 以上后, 产沙系数对雨强的变化不太敏感^[21]。

4.2 对洪水及其含沙量的影响

基于 1970~2000 年黄土区支流的实测数据, 点绘其林草地植被盖度与水流含沙量的响应关系、林草植被覆盖率与产洪系数之间的关系见图 8 和图 9。为突出林草植被的影响, 图中涉及河流的坝库控制面积和梯田面积占流域面积的比例分别小于 10% 和 4%。由图可见, 在流域层面上, 水流含沙量与林草地植被盖度呈负相关的直线关系, 林草植被覆盖率与产洪系数的响应关系则与图 6 相近; 而森林对洪峰的削减作用早已成为人们的共识^[11~12]。林草植被正是通过对洪水的含沙量、洪量和洪峰等多向削减, 实现流域产沙量和产水量的减少。

值得注意的是, 基于图 8, 即使植被盖度达 60%~70%, 洪水最大含沙量仍可能达 600 kg/m³、汛

图 8 水流含沙量与林草地植被盖度的关系

图 9 林草植被变化对流域产洪量的影响

期平均含沙量仍可能达 200 kg/m³。以源自黄龙山次生林区的云岩河和仕望川为例, 20 世纪后期两支流林草植被盖度一直高达 75%~90%, 但同期最大含沙量仍达 500~600 kg/m³。由此可见, 高含沙洪水仍然是未来黄土高原支流的常遇洪水, 但含沙量会较以前明显降低。

当植被恢复至一定程度后, 植被类型似乎对产沙影响不明显。图 8 中植被盖度大于 60% 的点距主要来自次生林区支流, 其它点距的植被则以灌草为主。到 2013 年, 尽管植被盖度已分别达 56%、66% 和 72%, 但佳芦河、清涧河和延河流域的植被类型仍以灌草为主, 由图 8 可见, 其点距仍服从原点群的线性趋势。不过, 因树下的地表覆盖物被清理, 若无梯田或水平沟配合, 人工经济林的减沙作用很不明显^[21]。

5 结论

1) 基于不同时期的卫星遥感影像, 分析了黄河中游主要来沙区林草植被状况自 20 世纪 70 年末至 2013 年的变化。与 20 世纪 70 年代末相比, 河龙间黄河以西地区和北洛河上游是目前林草植被覆盖率增大 115%~195%, 河龙间黄河以东地区和泾河多沙区增大 35%~51%; 但渭河多沙区仅增加 16%。

2) 从流域层面上分析了林草植被变化与产流产沙的响应关系, 以及林草植被对产洪产沙的调控机制, 认为: 林草植被是通过对洪水的含沙量、洪量和洪峰等多方面削减, 实现河流水沙的减少; 20 世纪 90 年代末以来, 多沙区林草植被覆盖率由 11%~25% 增大至 35%~55%, 该恢复过程恰经历了林草植被影响产沙的最敏感阶段。

3) 尽管近年林草植被的盖度明显恢复, 重力侵蚀现象仍将存在, 高含沙洪水仍然是未来黄土高原支流的常遇洪水, 但程度会较减轻。

黄河水沙情势是黄河下游宽滩区运用模式、黄河

水沙调控体系的布局 and 运用等治黄重大决策的基础。本文揭示的黄土高原林草植被状况变化情况及其产水沙响应机制, 显然有助于客观和科学评价现状和未来黄河水沙情势。

参考文献

- 1 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应. 自然科学进展, 2007, 17: 770-778
- 2 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学: 地球科学, 2007, 37: 1504-1514
- 3 莫宏伟, 任志远. 陕北榆阳区 1978 年至 2005 年植被覆盖率变化分析. 资源科学, 2009, 31: 1409-1414
- 4 李忠峰, 蔡运龙. 陕北榆林地区土地覆被变化分析. 地理科学进展, 2006, 25: 103-107
- 5 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004 年
- 6 景可, 王万忠, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境. 北京: 科学出版社, 2005 年
- 7 侯喜禄, 曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究. 水土保持通报, 1990, 10: 33-39
- 8 吴钦孝, 赵鸿雁. 植被保持水土的基本规律和总结. 水土保持学报, 2001, 15: 13-15
- 9 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗蚀性. 水土保持学报, 1993, 7: 11-18
- 10 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡面沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究. 水利学报, 2007, 38: 112-119
- 11 兰跃东, 康玲玲. 森林植被和小流域生态修复对水沙变化的影响研究. 水土保持通报, 2010, 30: 35-38
- 12 孙阁. 森林对河川径流影响及其研究方法的探讨. 国土与自然资源研究, 1987, 2: 67-71
- 13 芦金发, 黄秀华. 黄河中游地区流域产沙中的地貌临界现象. 山地学报, 2004, 22: 147-153
- 14 王清华, 李怀恩, 卢科锋, 等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. 水资源与水工程学报, 2004, 15: 21-23
- 15 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区高含沙水流的粒度组成及其地貌学意义. 泥沙研究, 1999, 15: 13-17
- 16 王兴奎, 钱宁, 胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程. 水利学报, 1982, 7: 26-35
- 17 廖建华, 李丹勋, 王兴奎, 等. 黄土高原侵蚀产沙与高含沙水流空间分异对比分析. 自然资源学报, 2010, 25: 100-111
- 18 唐克丽, 王斌科, 郑粉莉, 等. 黄土高原人类活动对土壤侵蚀的影响. 人民黄河, 1994, 2: 14-16
- 19 刘晓燕, 刘斌, 杨胜天. 黄土高塬沟壑区产沙驱动力及减沙潜力分析. 人民黄河, 2014, 36: 1-3
- 20 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流量影响的初步分析. 地理学报, 1978, 33: 112-127
- 21 刘晓燕, 杨胜天, 金双彦, 等. 黄土丘陵沟壑区大空间尺度林草植被减沙计算方法研究. 水利学报, 2014, 45: 135-141

The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin

LIU XiaoYan¹, YANG ShengTian², LI XiaoYu³, ZHOU Xu², LUO Ya², DANG Su Zhen⁴

¹ Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

² School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

³ Yellow River Institute of Hydrology and Water Resources, Zhengzhou 450004, China

⁴ Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China

Since 2000, the vegetation restoration has been significant in the Loess Plateau. Almost concurrently, the measured sediment discharge of the main stem of the Yellow River has been significantly reduced. Based on the vegetation information from remote sensing images from end of 1970's to 2013, this paper introduced the concepts of erodible area, forest and grassland proportion, vegetation coverage and the percentage of effective vegetation, and analyzed the vegetation change of scale, coverage and type. By introducing the concepts of percentage of effective vegetation, sediment yield coefficient and runoff yield coefficient, the sediment and flood yield for different vegetation conditions were discussed at the watershed scale, revealed the reasons for dramatically runoff and sediment yield reduction in the study area. The results showed that compared with the late 1970's, the vegetation just changed a little before 1998. While the vegetation coverage increased from 11%–25% to 35%–55% during 1998 to 2013, this vegetation improvement process is also the sensitive stage of vegetation change and sediment yield. High sediment concentration floods would still be the common flood of tributaries in the Loess plateau in future, while the sediment concentration would be reduced.

Loess Plateau, severe erosion area, vegetation restoration, sediment and runoff production, influence mechanism

doi: 10.1360/N092015-00028