



黄土高原

多尺度土壤侵蚀与 水土保持研究

高海东 李占斌 李 鹏 任宗萍 贾莲莲/著



科学出版社

黄土高原多尺度土壤侵蚀与水土保持研究

高海东 李占斌 李 鹏 任宗萍 贾莲莲 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从坡面、小流域、黄河中游典型支流以及整个黄土高原四个尺度出发,阐述了作者在黄土高原土壤侵蚀及水土保持等方面的最新研究成果。在坡面尺度上,重点阐述黄土高原土壤侵蚀的发生发展机理;在小流域尺度上,重点关注淤地坝、梯田以及退耕还林(草)等水土保持措施的水文泥沙效应;在中尺度流域上,阐述了黄河中游典型多沙支流的水沙变化特征及其影响因素,揭示典型支流基流变化特征及其对水土保持措施的响应;在整个黄土高原尺度上,研究了黄土高原社会经济以及生态治理变迁,论述了黄土高原的治理潜力,并阐明水土保持措施对黄土高原粮食产量及主要河流水沙变化的影响。最后,从协调黄河中游治理及下游水沙平衡出发,提出黄土高原治理对策。

本书可供从事地理学、水文学以及土壤侵蚀与水土保持的相关科研人员与学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原多尺度土壤侵蚀与水土保持研究/高海东等著. —北京:科学出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-03-050148-6

I. ①黄… II. ①高… III. ①黄土高原-土壤侵蚀-研究②黄土高原-水土保持-研究 IV. ①S157

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 239464 号

责任编辑:张井飞/责任校对:何艳萍

责任印制:张倩/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年11月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:430 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

黄土高原由于严重的生态环境问题为国内外学者所瞩目,同时是国家生态建设重点推进区域。土壤侵蚀是黄土高原主要的生态环境问题,而大力开展水土保持工作是扭转黄土高原生态面貌的重要举措。随着国家生态文明战略的推进,未来对于黄土高原治理会进一步加强。因此开展黄土高原多尺度土壤侵蚀与水土保持研究,为黄土高原社会经济与生态建设可持续协调发展以及黄河健康维系具有重要意义。

本书共4篇16章,从坡面尺度、小流域尺度、黄河中游典型支流以及整个黄土高原四个尺度上,系统开展了黄土高原的土壤侵蚀与水土保持研究。在坡面尺度上,从天然坡面、室内坡面以及抽象坡面三个层次上,阐述土壤侵蚀的发生机理及其发展过程,并分析了水土保持措施对坡面土壤侵蚀模数的影响。

在小流域尺度上,分析了梯田、淤地坝以及林草措施对水文过程及侵蚀输沙的影响。具体有:基于SEBAL遥感模型,分析了水土保持措施对流域蒸腾蒸发量的影响。坝地由于分层淤积,根据野外入渗模拟,具有明显的阻水作用,使用MIKE SHE地下水模型,模拟了坝地分层淤积下的水分运动特征。基于图论理论,阐述了淤地坝对流域汇流过程的作用机制。最后,在分析水土保持措施对泥沙过程影响的基础上,通过构建流域侵蚀控制度的概念,研究了小流域土壤侵蚀调控潜力。

黄河中游典型支流尺度上,采用趋势分析方法,分析了径流泥沙变化趋势,并使用Markov过程以及Copula函数,分析了黄河中游典型支流水沙丰枯组合状态及其遭遇频率。采用基流指数法,研究了黄河中游典型支流基流变化特征,最后采用方差分析方法,研究了黄河中游典型支流水沙变化对生态建设的响应。

在整个黄土高原尺度上,作者首先分析了黄土高原人口增长和社会经济空间分异特征。其次,在阐述黄土高原粮食产量时空格局特征的基础上,分析了淤地坝建设、坡改梯以及退耕还林对黄土高原粮食产量变化的影响。在系统研究黄土高原淤地坝、梯田以及植被恢复潜力的基础上,提出了黄土高原治理对策。最后,针对淤地坝“淤满”这一极端情景,分析了淤地坝淤满后的水沙变化特征,并提出防控对策。

本书研究成果由国家自然科学基金项目(41401305、41330858、41601291)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(K318009902-1407、A318009902-1510)共同资助完成,在此特向国家自然科学基金委员会以及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室致以衷心的感谢。

全书大纲由李占斌和高海东共同商定;第1、2章由李占斌、高海东撰写;第一篇由高海东、贾连连撰写;第二篇由高海东、李占斌、李鹏撰写;第三篇由高海东、任宗萍撰写;第四篇由高海东撰写。博士研究生赵宾华、杨媛媛,硕士研究生李雄飞、王飞超、陈

怡婷承担了部分小节以及图表的编辑工作。

在成书过程中，西安理工大学鲁克新、徐国策、程圣东、时鹏、肖列、于坤霞等对本书提出了很多具体修改意见，在此表示感谢。西北大学庞国伟、中国科学院水利部水土保持研究所王兵以及中国科学院地球环境研究所王凯博对本书进行了修改完善，在此一并感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现疏漏之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016年8月于西安

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	2
1.3 国内外研究进展	3
参考文献	8
第2章 材料与方法	13
2.1 研究区概况	13
2.2 数据来源与处理	21
2.3 研究内容	22
2.4 研究方法思路	23

第一篇 坡面尺度下土壤侵蚀机理与水土保持效应

第3章 黄土区天然坡面下径流侵蚀产沙试验研究	27
3.1 引言	27
3.2 试验材料与方法	28
3.3 模拟降雨条件下地表糙度的变化及其对径流产沙影响	29
3.4 不同土地利用类型条件下坡面径流侵蚀产沙试验研究	34
参考文献	41
第4章 植被格局对坡面侵蚀产沙过程调控试验研究	43
4.1 试验设计	43
4.2 裸坡条件下坡面产流产沙影响因子分析	46
4.3 不同植被格局下坡面侵蚀产沙特征分析	52
参考文献	66
第5章 水土保持措施对坡面侵蚀模数的调控作用	67
5.1 典型水土保持措施对流域地形的影响	67

5.2 梯田建设和坝地淤积对土壤侵蚀模数的定量分析	77
参考文献	90

第二篇 小流域水土保持措施的水文泥沙效应

第6章 不同水土保持措施下的流域蒸腾蒸发量特征	95
6.1 SEBAL 模型原理与算法	97
6.2 研究区 NDVI 分布特点	101
6.3 研究区地表反照率分布特点	102
6.4 研究区净辐射特征	103
6.5 研究区土壤热通量特征	104
6.6 研究区感热通量特征	105
6.7 不同水土保持措施下流域蒸散发特征	106
参考文献	108
第7章 坝地土壤水分特征研究	110
7.1 坝地土壤含水量特征	110
7.2 坝地土壤入渗特征	113
7.3 小流域土壤有效水容量空间分布特征	115
7.4 坝地水文过程模拟	118
参考文献	125
第8章 水土保持措施对汇流过程的影响分析	126
8.1 数据来源与处理	126
8.2 流量计算方法	128
8.3 水土保持措施对径流系数及输沙模数的影响	129
8.4 水土保持措施对流域滞时的影响	129
8.5 淤地坝对径流过程影响的机理分析	131
参考文献	133
第9章 小流域水土保持措施对泥沙过程的影响	135
9.1 淤地坝淤积过程对沟坡稳定性影响研究	135
9.2 典型暴雨下淤地坝系对流域泥沙输移比影响	141
9.3 小流域土壤侵蚀调控潜力研究	143
参考文献	150

第三篇 黄河中游典型河流水沙变化 及其对水土保持措施的响应

第 10 章 黄河中游典型支流水沙变化特征	155
10.1 黄河中游地区降水量及参考蒸发变化特征	155
10.2 黄河中游主要河流径流输沙变化特征	157
10.3 黄河中游典型河流水沙丰枯组合状态及遭遇频率分析	160
10.4 黄河中游主要水文站径流输沙关系研究	171
10.5 黄河中游主要河流泥沙输移比研究	172
参考文献	173
第 11 章 黄河中游典型支流基流变化特征及其对生态建设的响应	174
11.1 基流分析方法	174
11.2 黄河中游典型河流年基流变化特征	176
11.3 生态建设对水沙影响分析	178
参考文献	183
第 12 章 黄河中游典型支流水沙情势对气候变化的响应	184
12.1 流域未来气候情景模拟	184
12.2 基于 SWAT 流域水沙变化模拟	192
12.3 未来气候情景下的水沙变化趋势预估	203
参考文献	209

第四篇 黄土高原治理潜力及其治理对策

第 13 章 黄土高原人口增长和社会经济空间分异特征	213
13.1 黄土高原行政区划与治理分区	213
13.2 黄土高原人口增长及分布	217
13.3 黄土高原社会经济发展	219
13.4 黄土高原人民生活水平变化	221
参考文献	227
第 14 章 水土保持治理对黄土高原粮食产量的影响	228
14.1 黄土高原粮食产量时空格局特征	228
14.2 黄土高原水土保持措施对粮食产量的影响	235

参考文献	239
第 15 章 黄土高原水土流失治理潜力研究	241
15.1 研究思路	241
15.2 黄土高原梯田建设潜力	242
15.3 黄土高原植被恢复潜力	245
15.4 黄土高原淤地坝建设潜力	258
参考文献	268
第 16 章 平衡黄土高原坡面与沟道措施	270
16.1 黄河水沙变化	270
16.2 坡面措施对土壤侵蚀模数的影响	271
16.3 沟道措施对产沙的影响	272
16.4 平衡黄土高原坡面与沟道措施	274
16.5 淤地坝淤满后的水沙调控措施	278
参考文献	282

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

黄土高原以其黄土连续大面积而深厚的分布、地貌形态之复杂、水土流失之严重，令国内外学者瞩目。黄土高原南以秦岭为界，北以阴山为界，东以太行山为界，西以贺兰山、日月山为界。地理坐标范围绕为东经 $100^{\circ}52'$ ~ $114^{\circ}33'$ ，北纬 $33^{\circ}41'$ ~ $41^{\circ}16'$ ，包含青、甘、宁、蒙、陕、晋、豫等七省（区），总面积 64.20 万 km^2 ，约占国土面积的 6.50% ，由于地形破碎、土壤抗蚀性差、暴雨强度大、植被稀疏，因此，水土流失异常严重，也使黄河成为闻名世界的多泥沙河流。根据水利部第二次遥感调查（水利部等，2010），2002 年土壤侵蚀面积为 39.08 万 km^2 ，占黄土高原总面积的 62.63% 。其中水力侵蚀 33.41 万 km^2 ，占黄土高原总面积的 53.54% ，风力侵蚀 5.62 万 km^2 ，占黄土高原总面积的 9.01% ，冻融侵蚀 0.05 万 km^2 ，占黄土高原总面积的 0.08% 。水力侵蚀是黄土高原最主要的土壤侵蚀类型，分布非常广泛，总体反映了黄土高原土壤侵蚀的特点。其中，轻度水力侵蚀占 30.32% ，中度水力侵蚀占 32.37% ，强度以上水力侵蚀占 37.31% 。风力侵蚀主要发生在黄河流域东北部地区，分布于内蒙古中西部、陕西北部和宁夏境内，强度以上的风力侵蚀占风力侵蚀总面积的 48.97% ，表明该区风力侵蚀非常严重。冻融侵蚀主要分布于黄土高原西部山体的上部，由于该区地势较高、气温较低，冻融侵蚀比较活跃。根据水利部、中国科学院以及中国工程院的水土流失科考，黄土高原的土壤侵蚀具有以下特点：土壤侵蚀加速的趋势得到缓解，水土流失形势依然严峻；土壤侵蚀强度高，侵蚀类型多样；时空分布集中；重力侵蚀活跃、沟道侵蚀严重等。

严重的水土流失和原有地面植被的破坏，恶化了生态环境，加剧了土地和小气候的干旱程度以及其他自然灾害的发生，进而造成土地瘠薄、肥力减退、破坏农业生产；而沟壑扩大，使大面积坡耕地支离破碎，耕种不便，以至弃耕荒废，造成耕地减少，水利部提供的统计资料显示：半个世纪以来，我国水土流失毁掉耕地 267 多万 hm^2 ，直接影响了农田基本建设和农业生产的发展。水土流失还使黄河下游河床高出两岸外平地 $3 \sim 10\text{m}$ ，最高处达 10m 以上，成为举世瞩目的“地上悬河”，同时改变了河势，减小了行洪能力，直接威胁着下游两岸地区广大人民生命财产的安全。为了减少黄河下游河道淤积和降低河床的急剧抬高，每年需使用大量的水资源用于冲沙入海，严重影响了黄河流域有限水资源的综合利用。多年研究结果表明（水利部等，2010）：为不使黄河下游河道淤积进一步加剧，每年约需 200 亿 ~ 240 亿 m^3 的输沙水量，平均冲沙需水量为 $33 \sim 60\text{m}^3/\text{t}$ 。水土流失还产生

大量泥沙下泄，淤积水库，降低了水利设施的蓄水功能，影响了水资源的开发利用。严重的水土流失使土壤肥力衰减，粮食产量低而不稳，当地农民群众为了生存，不得不开垦坡地，广种薄收，形成了“越穷越垦，越垦越穷”的恶性循环，使生态环境不断恶化，制约了当地经济发展。

水土保持措施是指为防治水土流失，保护、改良与合理利用水土资源，改善生态环境所采取的工程、植物和耕作等技术措施与管理措施的总称。工程措施主要包括沟道工程措施和坡面工程措施两大类。沟道工程措施包括治沟骨干工程、淤地坝、沟头防护、谷坊和塘坝等小型蓄水工程。坡面工程包括梯田、条田等；植物措施主要指开展人工林、经济林、果园、人工草地建设，实施封禁、轮牧退耕还林（草）等措施；耕作措施主要包括等高沟垄种植、草田轮作等。新中国建立以来，黄土高原地区水土保持工作，经历了由重点试验到全面发展的过程，在科学研究的指导与国家政策的支持下，水土保持工作逐渐深入，取得了瞩目的成果和快速发展，经历了几个不同的发展阶段和若干时段。从 1950 ~ 1963 年的探索治理阶段→1963 ~ 1970 年的重点治理阶段→1979 ~ 1980 年的全民治理阶段→1980 ~ 1990 年的小流域综合治理阶段→1991 以来的以法制建设和生态经济可持续发展为目标的全面发展阶段（黄河上中游管理局，1993）。经过半个多世纪的探索历程，从造林种草、恢复植被，到改造坡地、修建基本农田，再到治理沟壑、筑坝拦沙淤地以及广泛实行封育等，经历了“探索—实践—再探索—再实践—全面发展”的历程，总结出了一条以小流域为基本单元，“山、水、田、林、路统一规划，沟、坪、梁、峁、坡综合治理”，植物措施、工程措施、耕作措施科学配置，生态效益、经济效益、社会效益协调发展的具有黄土高原特色的水土保持路子，较好地解决了治理与开发、治坡与治河的关系。水土保持在改善当地生态、生产、生活的同时，也为黄河的安澜和人与自然的和谐相处，发挥着重要作用。

1.2 研究意义

土壤侵蚀过程是一个多尺度的水-沙-养综合作用过程，在不同的尺度下，土壤侵蚀的表现形式与研究侧重点也有所不同。开展多尺度土壤侵蚀与水土保持研究，对于完善水土保持科学体系，提升土壤侵蚀过程机理的认识，具有重要的理论意义。

为了遏制严重的土壤侵蚀，在黄土高原已经开展了大规模的生态治理工程，随着国家生态文明战略的提出，黄土高原水土流失治理将会推向更高的水平。规模巨大的水土保持建设，对黄土高原以及黄河将产生什么影响？影响程度如何？是每位黄土高原生态环境建设者和关心者们最值得关注的问题，虽然目前关于水土保持措施的生态环境效应研究已有大量成果，但是，水土保持措施对流域的水文循环过程进行系统性研究还不足，对水循环的一些基本环节，如蒸发过程，还较少涉及。随着治黄水平的不断提高，人们已经不再满足一条沟、一条流域以及一个地区的水土流失治理，而应该站在整个黄河的高度上，通过协调中游治理和下游水沙，达到黄河流域整体健康。这对中游水土保持的研究提出了更高的要求，如何平衡黄土高原坡面与沟道措施？既能保持生态环境需要又能满足地区粮食供

给,如何协调中游治理程度与下游水沙关系?成为亟需解决的问题。而系统研究中游治理与下游水沙的协调关系,对于指导黄土高原综合治理、维护黄河流域整体健康,具有十分重要的意义。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 坡面侵蚀产沙研究进展

坡面是侵蚀发生最基本的单元,也是流域最基本的组成单元之一,山地丘陵区的人类活动主要集中在坡面上,对于侵蚀过程的研究往往从坡面开始。坡面侵蚀类型包括雨滴击溅侵蚀、面蚀、细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀。整个坡面的侵蚀发展过程基本上为上述几个相互嵌套的过程组合而成(郑粉莉、高学田,2003),坡面侵蚀过程的研究就是对上述各个过程发生发展的规律进行定量分析,了解其在坡面侵蚀产沙中的作用,以及各种影响因素对整个侵蚀过程及侵蚀结果的作用。目前对其侵蚀现象与规律的探究,历来为黄土高原环境整治中理论性与实践性均很强的重要科学命题。但是由于缺乏侵蚀过程定量和坡沟泥沙来源辨识手段,坡沟侵蚀产沙的研究一直停留在定性描述阶段。

席承藩等(1953)、黄秉维(1955)、朱显谟(1956)、罗来兴(1958)、朱震达(1958)、陈永宗(1984)等在不同时期,曾就黄土高原土壤侵蚀类型和侵蚀分区等问题进行过深入细致地研究。承继成(1965)、陈永宗(1988)等曾就黄土区土壤侵蚀方式和侵蚀形态的垂直分带性规律进行过不同程度的分析和讨论,认为坡地流水作用是一个十分复杂的问题,它取决于坡形、坡长、地表抗蚀强度、地表径流强度、降雨特征等诸多因素。唐克丽(1991)总结归纳前人研究成果,并结合“七五”工作实践,深入系统地论述了黄土高原地区土壤侵蚀的区域特征。这些研究结果,大大深化了人们对于黄土高原侵蚀环境及其土壤侵蚀区域分异规律的认识,尤其是清楚地为我们展示了坡面土壤侵蚀方式和侵蚀形态空间垂直分异的基本格局,为从定量和动力学角度研究坡沟关系和坡沟系统土壤侵蚀规律奠定了基础。

20世纪40年代初,我国在甘肃天水建立水土保持试验站,开始坡沟系统土壤侵蚀的野外定位观测。但设备简陋,观测项目少,真正大规模地系统观测研究是在新中国成立后发展起来。龚时旻和蒋德麒(1978)、曾伯庆(1980)、常茂德(1986)、徐雪良(1987)等都进行了研究与分析。焦菊英和刘元保(1992)对不同估算方法的优劣进行了评价,并提出用系统法计算黄土丘陵区小流域沟间地与沟谷地的侵蚀产沙量。获得了一些有益的结论:首先从侵蚀模数的比较可以看出,沟谷地的侵蚀强度一般大于沟间地。其次,就黄土台状地沟壑区而言,泥沙绝大多数来自沟谷。就典型黄土丘陵沟壑区而言,如果沟谷地和沟间地面积相近,则泥沙主要来自沟谷地;如果沟间地面积比沟谷地大得多(如团山沟),则泥沙大部分来自沟间地。齐矗华等(1991)根据调查资料推测,黄土长坡丘陵(山地)沟壑区,沟间地侵蚀总量可能大于沟谷地侵蚀总量。再次,如果不受上坡或塬面来水来沙

的影响,沟谷的侵蚀强度将大大降低。陈浩(1992)结合离石羊道沟观测资料和室内模拟试验结果,也强调了上部来水来沙的影响,对整个坡沟系统产流产沙过程的强化作用。唐克丽等(1983)通过对杏子河流域的考察指出,沟谷陡坡的毁林开荒是该流域土壤侵蚀加剧的重要原因。唐克丽(1993)还在子午岭林区长期设站观测,研究植被恢复前后的土壤侵蚀特点,指出唯有当沟谷植被破坏殆尽时,其侵蚀强度才将超过坡面的侵蚀强度,可见植被抑制侵蚀作用之显著。

国际土壤侵蚀研究迄今已有一百多年的发展历史,德国土壤学家 Wallny (1977 年至 1985 年)完成了第一批土壤侵蚀小区观测试验。其间经历了 20 世纪 20 年代以前,以定性描述为主要特征的土壤侵蚀宏观规律的观察与认识时期;20 年代至 60 年代,以定位观测和定量表达为标志,通用土壤流失方程式及各种经验关系方程的建立及应用发展时期;60 年代以后,特别是 80 年代以来,以过程为目标,理论分析,试验模拟及数学模拟相结合的土壤侵蚀动力学机制的研究时期等三个主要发展阶段。

降雨产流后,径流顺坡向下运动,分别形成坡面流,细沟、浅沟流及沟道流等多种水流类型,在其作用下相应形成了片蚀,坡面沟蚀及沟道侵蚀等土壤侵蚀方式和类型。Horton (1945)最早从水文学角度对坡面流的特性进行了系统的定量研究。Emmett (1970)则从试验的角度对坡面流的水力学特性进行了详细分析。同期,Yoon (1971)、Shen 和 Li (1973)也据试验资料,分析过坡面流的阻力规律。Young 和 Wiersma (1973)、Foster 等 (1984)及 Sadeghian 和 Mitchell (1990)曾通过不同条件下的试验研究和理论分析探讨过细沟流的流速及分布、水力半径及阻力系数的表达式。Govers (1992)根据野外调查和试验研究,建立了细沟流的流量、流速与过水断面面积间的关系。各种水流类型的产沙与输沙的力学特征,一般包括泥沙的性质,分离作用及规律,泥沙运动形式,挟沙能力,输沙率、输移比等,还应研究降雨在产流产沙及输沙中的作用与特点。Horton 等 (1934)最早把坡面流的侵蚀作用与水流的切应力联系起来。Meyer 和 Wischmeier (1969)、Foster 等 (1977)及 Nearing 等 (1989)等从这一角度进行了深入研究。Julien 和 Simons (1985)运用量纲分析方法,建立了坡面流输沙能力的无量纲关系式。Foster (1982a)、Meyer (1985)曾分析过细沟流分离土壤的作用。Foster (1982b)还认为,许多明渠流的输沙关系式可用来描述细沟流的输沙能力。

1.3.2 典型生态工程对水文-泥沙过程的作用

为了遏制严重的水土流失,我国政府采取了调整土地利用结构、恢复植被、改进耕作方式、在坡面修建梯田以及在沟道修建淤地坝等一系列水土保持措施 (Zhu, 2012; Bullock and King, 2011)。截止 2010 年 (黄河上中游管理局, 2011),已修建各类型淤地坝 9 万多座,淤成坝地 28.63 万 hm^2 ,修建梯田 281.85 万 hm^2 ,造林 968.28 万 hm^2 。大规模水土保持的实施,造成黄河输沙量急剧减少,三门峡 1919 ~ 1960 年实测输沙量平均值为 16 亿 t,而 1990 ~ 2007 年降至 6 亿 t,减少了 10 亿 t,其中降雨因素减沙占 50% ~ 60%,水利水保措施作用占 40% ~ 50% (水利部黄河水利委员会, 2013)。对于水利水保措施的减沙作用,国内外学者进行了深入分析,水保措施主要分为梯田、淤地坝以及退耕

还林(草),而研究区域多集中在黄河中游河龙区间的粗泥沙集中来源区(姚文艺等,2013)。如刘晓燕等(2014)认为,黄土高原水平梯田的减沙作用很可能一直被低估,有埂水平梯田对流域的减沙潜力可达65%~90%,当梯田比大于35%~40%,其减沙作用基本稳定在90%左右。张晓萍等(2009)研究认为,黄河中游河龙区间土地利用/覆被变化等人类活动对流域径流减少影响程度超过50%,而淤地坝的建设,使流域原有的泥沙输移与沉积关系发生了显著变化。有研究表明(谢旺成、李天宏,2012),天然情况下,黄土高原流域的泥沙输移比一般为1左右,而随着坝库工程的建设,显著地降低了流域的泥沙输移比,如无定河流域泥沙输移比降至0.2和0.4之间(许炯心、孙季,2004)。

(1) 淤地坝

淤地坝是指在多泥沙沟道修建的以控制沟道侵蚀、拦泥淤地、减少洪水和泥沙灾害为主要目的的沟道治理工程设施。淤地坝拦水拦沙作用效果十分显著。作为黄土高原特有且应用广泛的水土保持措施,国内外学者对淤地坝的拦水拦沙效益进行了广泛且深入的研究,研究地区主要集中在黄土高原河口—龙门镇区间以及泾渭洛汾等黄河泥沙主要来源区(焦菊英等,2001;冉大川等,2004;王随继、冉立山,2008;许炯心,2010);研究方法从基于经验的水保法,逐渐发展到基于物理机制的水文模型法,从原型观测发展到近年来的室内模型试验(袁建平等,2000)。在研究过程中,特别注重定量分区气候变化与人类活动分别对减水减沙的贡献率。研究结果认为,淤地坝显著地削弱了流域的洪峰流量,减少了流域的径流量,对径流过程具有明显的调控作用(杨启红,2009;冉大川等,2010)。但也有学者认为淤地坝对流域的年径流影响不大,对地下水起到了很好的补充作用。如蔡俊谕等(2010)运用经验公式法、双累积曲线法和不同系列对比法分析得出,岔巴沟流域库坝等工程措施汛期减水作用大于25%,而对流域年径流量的影响不大,减水作用在7%左右,但对径流的时空分布作用明显,地下径流占总径流比例提高了20.4%,对地下水的补充起到了很好的作用。

坝地是在淤地坝拦泥淤地过程中逐渐形成的,目前已经成为黄土高原地区的重要粮食高产区。根据泥沙运动理论,在黄土高原丘陵区,洪水挟带进入淤地坝内的侵蚀泥沙,往往是粗颗粒泥沙先沉积,其次为粉砂,最后为黏粒,加之不同暴雨的径流挟沙能力差异,坝地土壤垂直结构具有明显的分层特点,其厚度与分布和降雨特性、侵蚀泥沙特性密切相关。这一现象在众多的野外观测中得到佐证(管新建等,2007;张信宝等,2007;龙翼等,2008;Zhao et al., 2009;薛凯等,2011)。坝地层状结构的存在,影响了坝地土壤水分的运动,根据作者的野外观测,坝地土壤水分具有明显的分层结构,坝地这种层状的土壤结构也使坝地可以保持更多的水分,发挥着土壤水库的作用,如张红娟等(2007)对绥德县韭园沟流域三角坪和团圆沟1#坝地土壤水分分析结果表明:三角坪坝和团圆沟1#坝存水量分别占到1954~1997年间韭园沟流域年均径流量的6.12%和1.87%。已淤平坝地存贮了大量水资源,在一定程度上会减少地表径流量。徐学选等(2007)在对延安燕沟流域土壤水资源进行研究后认为:各类土地利用方式中坝地土壤含水量最高,梯田次之,灌木林土壤最干燥。各类土地利用下的储水能力指数从大到小依次为坝地、梯田、荒地、坡耕地、林地、灌木林地。水土保持措施主要增加深层储水,而0~1m浅层往往呈现负增加,特别是0~0.4m土层。也有学者对坝地土壤水分与地下水的转化关系和坝地土壤水分

的去向进行了初步研究,如宋献方等(2009)通过氢氧同位素示踪研究后认为,大部分支沟的地表径流主要是地下水排泄与淤地坝拦蓄的前期降雨径流混合而成,淤地坝在拦蓄降雨径流进而增大流域的基流量方面具有积极作用,完整的淤地坝促进地表水向地下水转化、减小地下水的排泄,是人类活动影响地表水与地下水转化的重要区域,而且淤地坝容易增大地表淤积物及地表径流的矿化度,但尚未对较深层地下水的矿化度形成明显的影响。黄金柏等(2011)对黄土高原北部六道沟流域的淤地坝数值计算结果表明:地表径流量、蒸散发量、入渗量以及地下水流出量分别占淤地坝系统总来水量的36.0%、49.3%、11.6%及3.1%,淤地坝系统对水资源再分布的影响主要体现在减少地表径流、增加蒸散发及入渗。

(2) 梯田

梯田是在黄土高原等土层深厚地区广泛采用的坡面水土保持措施,梯田显著地改变了坡面产汇流的下垫面特征,如梯田改变了地表的坡度组成,缩短了坡长,改变了坡面径流的方向(李亚龙等,2012)。长期、大量的野外小区实测试验显示:梯田的减水效益在80%以上,且和梯田质量降雨强度相关(焦菊英等,1999;吴发启等,2004;康玲玲等,2005)。坡改梯后,降水很快发生入渗,入渗过程中进入土壤中的水在土壤中运动时受分子力、毛管力和重力的影响,其运动过程也就是在各种力综合作用下寻求平衡的过程。分子力、毛管力随土壤水分的增加而减少,因此水分的入渗速度随着时间延长也不断降低(Western et al., 2004)。

(3) 林草恢复

林草恢复作为治理水土流失、改善生态环境中一项重要的而且也是极为有效的生物措施,一直受到人们的关注。降水和太阳辐射通过林草的重新分配,林地土壤水分状况和林草固定太阳能的比例就会发生改变,从而直接影响土壤水分和养分的共同利用关系(云雷等,2011),另外,林草凋落物也通过形成腐殖质,改善土壤结构,提高土壤入渗性(Pritchett and Fisher, 1987),调节地表径流,从而对土壤侵蚀及养分流失起到重要的防治作用。如果从流域蓄水量的角度去阐述,林草恢复过程中,存在着两个相反的效应,一是林草覆盖度的增加,能提高流域的蓄水量(Zhang et al., 2010),调控并减少水分消耗,另一方面,植被覆盖度的增加,特别是林地的增加,又增加了区域的蒸腾蒸发量(Ferraz et al., 2013),造成干旱化。近年来受到广泛关注的黄土高原干层问题就是植被恢复过程中土壤水分互馈机制下发展的,土壤干层是指林草植被过度耗水情况下,深层土壤水分亏缺,土层剖面一定深度内形成长期较稳定存在的干燥化土层(李玉山,2001)。据调查,土壤干层普遍存在于黄土高原各地区,从东南到西北方向由于干旱的气候条件和较低的土壤水储量,土壤干化程度逐渐增加(杨文治,2001;曹裕等,2012;Fan et al., 2010;Wang et al., 2010),其中较为严重的区域是产生大面积低效低产林的黄土高原丘陵沟壑区。

通过构建基于DPSIR概念模型的中尺度水土流失综合治理生态环境效应评价指标体系,王兵等(2012)认为退耕还林(草)是生态恢复环境响应的敏感指标之一,充分体现其对流域生态环境的作用。张素芳和马礼(2013)以地处半干旱坝上高原沽源县为例,对比分析距地表约25cm处不同自然区域内林地、草地土壤含水量,结合当地农户走访和

野外调查发现:草地或灌木林地能够较好地保持土壤水分,乔木林地则相对较差。葛菁等(2012)等通过对二滩水库集水区10种未来土地覆被格局的分析,得出随地表林地和草地面积的增加,保沙价值增加;另有研究表明(潘竟虎,2009;谢红霞等,2009;徐学选等,2012),不同的退耕还林模式可减少径流及土壤侵蚀,增加微生物活性,改善土壤肥力。

1.3.3 流域生态建设的生态水文响应研究

生态建设在改变流域土地利用/覆被的过程中,流域水资源消耗-补偿的动态平衡关系发生改变,流域的生态服务功能相应地发生变化。王浩等(2007)采用WEP-L分布式模型分析了黄河流域土壤水资源消耗效用,研究表明有植被覆盖的土地,其无效消耗量较裸地的无效消耗量小。在调控土壤水资源的利用效用时,按照减少无效消耗、提高低效消耗、增大高效消耗的原则进行区域植被覆盖的调整。毛慧慧等(2009)利用集对分析法从微观层次上揭示出天津北三河系各流域水文变量间的相关关系和不确定性,指出部分流域入境洪水之间可能存在补偿特性,为流域的洪水资源化提供了条件。水的生态服务功能内涵和定义不清晰,评价方法不完善,研究范式较为单一。针对这些问题,张诚等(2011)提出了水的生态服务功能内涵与关键技术,并指出未来发展方向是生态水文过程模拟与原型观测手段结合的方法评价流域水生态服务功能以及面向流域生态安全与水安全的水资源配置与流域生态补偿机制。目前,国内外对水的生态服务功能比较清晰的定义是水生态系统及其生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用(欧阳志云,2007)。安塞县退耕还林还草政策对区域生态服务功能在8年间提升了12%,其中陡坡和中坡对生态服务功能增强的贡献率分别为27%和48%(冉圣宏等,2010)。高照良等(2012)从水土保持的生态系统功能角度构建了计算水土保持措施生态服务功能质量的计算公式。未来黄土高原大规模的生态建设继续实施,建立流域生态治理的优化布局模式,提出变化情势下流域生态水文的调控方法显得尤为重要。Maetens等(2012)在统计分析有关欧洲地中海地区103个径流小区水土保持措施对年径流、产流系数和年产沙量影响后,指出水土保持措施减沙量约为20%,减流效果不如减沙效果明显,而且生物措施和工程措施的效果好于耕作措施,减流作用更为重要但研究不够深入。Ruiz-Sinoga(2011)研究了西班牙南部半湿润、半干旱以及干旱三种地区弃耕地土壤水分对植被格局的影响,研究表明土壤水分在半干旱条件下对植被恢复有着非常重要的作用。农作物和植被措施(过滤带、覆膜、覆盖作物)和机械方法(梯田和等高耕作)比免耕或者少耕更有效地减少了径流和泥沙流失,并用SWAT模型模拟了减少的径流量。Huang等(2013)研究了不同雨强、下垫面和坡度对入渗的影响,研究表明植被能够提高土壤渗透性和土壤持水能力。黑麦比裸地湿润锋大10cm左右,且比裸地调节水分的能力更强。Sánchez等(2012)为了提高土壤水分的计算精确度对比了植被覆盖与土壤水分计算方法。通过分析植被覆盖利用归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)、植被覆盖比(FVC)之间的相关性,结合FAO56水量平衡方程确定作物系数,指出它们对水量平衡的影响。

1.3.4 水土保持生态活动对黄河年径流量的影响

梯田、林地、草地、淤地坝以及封禁治理等措施改变了局地能量和水量平衡过程,显著减少了地表径流量及其动能和势能,增加径流时空分布均匀性,同时,植被的水文效应不仅受区域气候控制,还与林种、林龄及面积有关;生物措施与工程措施在空间上的混合性、在各流域分布的不均衡性,导致流域降水产流时空表现趋于复杂化。在水土保持措施时、空相混条件下,流域降雨产流难以反应单一措施的影响,同时其规律的展现还受资料序列长短限制。降水等气候变化以及人类活动是影响径流变化的两个重要原因,哪一方面是主导因素也一直是被关注的问题。有研究认为,过去 50 年来黄河中游干流区段总减水量中,气候因素影响占近 1/2 (姚文艺等, 2011)。随着相关学科以及遥感、GIS 等技术的发展,从不同角度充分认识变化环境条件下流域径流量变化及区域表现特征,有利于理解和揭示区域环境效应的发展规律和演变机制。黄河中游河龙区间,新中国成立以来经历了大面积、大强度的生态环境建设和水土流失综合治理活动,但受当时经济和政策形势的影响,时空分布差异很大。据遥感影像分析,20 世纪八九十年代,河龙区间土地利用变化虽然以农耕地类减少、林灌地类增加为特征,但幅度很微弱,林地的分布格局在各主要流域中并没有太大改观 (水利部等, 2010)。同时,黄河流域总降雨近 50 年来呈下降趋势,但空间上则北部以增加为主,南部以减少为主。气候要素和下垫面条件的改变,深刻地影响着区域水文水资源及地区分配。典型流域研究表明,随着水土保持措施的实施,年径流量以及地表径流、基流量均呈减少趋势 (Huang and Zhang, 2004; Chen et al., 2007; Mu et al., 2007)。根据姚文艺等 (2011) 的研究,黄河中游河龙区间控制区及泾、洛、渭、汾河 1997 ~ 2006 年水土保持措施减水量为 26 亿 m^3 , 占该区域年径流量的 38%。伴随着黄河年径流量的减少,是黄河水资源承载能力的提高,赵建民等 (2010) 指出,黄土高原水土保持可以使黄河流域水资源多承载人口 3974 万 ~ 4179 万,能大幅度提高黄河流域的水资源承载力。

为适应新形势下的治黄战略需求,黄河水利委员会提出了“健康黄河”的概念,健康黄河的一个重要指标,就是河流要维持一定的低限径流;1986 年以来,由于人类用水的大幅度增加和天然降水的减少,黄河干流中下游约 3% ~ 8% 时段、干流利津 25% ~ 60% 时段的流量低于相应断面的低限流量 (刘晓燕等, 2006; 刘晓燕, 张原锋, 2006), 汾河和渭河等重点支流入黄流量也经常处于低限流量以下。水土保持措施是维护黄河健康的重要保障,因此,探讨水土保持等生态建设工程对流域水循环过程的影响,从水资源承载能力的角度去优化水土保持措施格局尤为重要。

参考文献

- 曹裕, 李军, 张社红, 等. 2012. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征. 农业工程学报, 28 (15): 72 ~ 79.
- 常茂德. 1986. 陇东黄土高原沟道小流域的土壤侵蚀. 水土保持通报, (3): 44 ~ 49.
- 陈浩. 1992. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响. 水土保持学报, 6 (2): 17 ~ 23.