

# 黄土高原不同生长年限植被减水减沙效益整合分析

赵跃中<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>2,3</sup>, 严宝文<sup>1</sup>, 赵广举<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 研究不同恢复年限植被减水减沙效益变化特征, 为黄土高原地区进一步合理配置林草措施和生态恢复的可持续性研究提供科学依据。[方法] 通过文献检索, 共收集到 18 篇相关文献, 运用整合分析的方法定量地研究了恢复年限增加对植被减水减沙效益的影响。[结果] 4 年生以上草地植被和 5 年生以上林灌植被可以发挥稳定的减水减沙效益, 且减沙效益基本保持在 80% 左右。林地枯落物对植被的减水减沙效益具有一定的促进作用。[结论] 受不同恢复阶段限制因素的影响, 林草植被减水减沙效益大致可以分为 3 个阶段: 栽植扰动阶段、水土保持阶段、水分限制阶段。

**关键词:** 整合分析; 减水减沙效益; 植被恢复; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0006-06

中图分类号: S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.009

## Meta-analysis on Runoff and Sediment Reductions of Re-vegetation with Different Planting Years on Loess Plateau

ZHAO Yuezhong<sup>1</sup>, MU Xingmin<sup>2,3</sup>, YAN Baowen<sup>1</sup>, ZHAO Guangju<sup>2,3</sup>

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the variation of runoff and sediment reductions of re-vegetation with different planting years in order to provide a scientific basis for allocating measures of grassland rationally further and studying the sustainability of ecological restoration on the Loess Plateau region. [Methods] A meta-analysis was conducted to quantitatively describe the effects of re-vegetation on runoff and sediment reductions by compiling eighteen papers. [Results] The vegetation of grassland planted for more than four years and woods and shrubs planted for more than five years had a stable benefit on runoff and sediment reduction with the increase of age, and the benefit remain at about 80%. Litters on the surface in the forest play an important role in promoting more runoff and sediment reductions. [Conclusion] In regard to the effects of water and sediment reduction of vegetation which were affected by many limiting factors, it can be divided into three stages as following: plant disturbance stage, soil and water conservation and moisture limited stage.

**Keywords:** meta-analysis; runoff and sediment reductions; re-vegetation; Loess Plateau

降雨引起的水土流失是全球性的生态环境问题, 中国是世界上水土流失最为严重的国家之一, 其中黄土高原地区的水土流失状况更为严重, 几乎所有类型 and 程度的水土流失均有发生。坡面径流是造成该水土流失的主导因子<sup>[1]</sup>, 由于林草植被覆盖可对降水进行再分配<sup>[2-3]</sup>, 并减小雨滴击溅动能, 从而减小土壤

侵蚀。20 世纪 90 年代以来, 黄土高原实施了大规模的退耕还林(草)等生态工程措施, 随着林草植被等生态恢复工程在黄土高原地区的实施, 该区地表径流量和河道输沙量显著下降<sup>[4]</sup>, 因此, 植被恢复是控制坡面侵蚀、减少水土流失并改善生态环境的关键水土保持措施之一<sup>[5]</sup>。由于不同植被恢复阶段的水土保持

收稿日期: 2014-05-06

修回日期: 2014-06-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“延河流域水沙变化及其对退耕还林(草)的响应”(41271295), “皇甫川流域泥沙来源的复合指纹示踪研究”(41201266); 中国科学院重点部署项目“近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

第一作者: 赵跃中(1988—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水文变化。E-mail: yuezhong.008@163.com。

通信作者: 严宝文(1970—), 男(汉族), 陕西省汉中市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土环境与保护工作。E-mail: yanbaowen@nwsuaf.edu.cn。

效益不同,研究不同恢复阶段植被减水减沙效益特征对进一步合理配置林草措施,有效防止水土流失反弹具有重要意义。

鉴于植被在保持水土、减少土壤流失中的重要作用,20 世纪 40 年代以来,通过对黄土高原野外坡面径流小区的长期监测,从植被类型、植被覆盖、降雨特征和坡面特征等方面对坡面植被减水减沙效益进行了一系列研究并取得了大量科研成果<sup>[6-9]</sup>。与这些研究相比,系统涉及植被恢复年限的水土保持研究成果相对较少。天然降水条件下观测所得到的坡面产流产沙数据可以客观反映植被变化与气候变化对坡面土壤侵蚀的影响,尽管其中也不乏长期定位观测<sup>[10-12]</sup>,但遗憾的是,由于野外试验条件所限,观测过程中天然降雨产沙资料有限,研究结果的推广应用无论是在时间上还是在空间上仍存在较大不足<sup>[13-15]</sup>。同时,对于植被随恢复年限增加所产生的阶段性变化特征,仅从效益值变化趋势角度作过相关的分析<sup>[16]</sup>,深入地系统分析尚未形成一致结论。

本文在集成黄土高原野外植被径流小区产流产沙相关文献数据的基础上,运用时空互代法,整合分析不同生长/退耕年限林、草、灌植被在天然降雨条件下的减水减沙效益,探索植被减水减沙效益随其生长年限变化的趋势,定量描述林草植被的减水减沙效益,以期为黄土高原地区进一步合理配置林草措施和生态恢复的可持续性提供科学依据。

## 1 研究区概况

黄土高原(33°43'7"—41°16'7"N,100°54'7"—114°33'7"E)主体位于黄河中上游地区,东起太行山,西至日月山,南界秦岭,北抵阴山,包括河北西部,山西大部,陕西中北部,甘肃中东部,宁夏南部及青海东部等地,面积约占 626 800 km<sup>2</sup>,平均海拔 1 000~1 500 m,15°以上坡面约占全区面积的 47.4%。黄土高原地区沟壑纵横,梁峁坡地分布广泛,表层土壤结构疏松易蚀,水土流失十分严重,其中水土流失总面积为 4.54×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,年均侵蚀模数 5 000~10 000 t/km<sup>2</sup>。该区水土流失随降雨时空分异较大<sup>[17]</sup>,河流泥沙主要是由每年夏秋季(6—9 月)的几场侵蚀性降雨(暴雨)造成的<sup>[18]</sup>。由于该地区在气候上属于干旱、半干旱地区,年平均降雨量多在 400 mm~700 mm,普遍难以维持乔木林的生长需水,草地和灌木林成为最主要的植被类型,在区域生态恢复中具有重要地位。2000—2008 年,黄土高原草地面积增加 6.6%,达到 2.714×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,灌木林面积增加 9.2%,达到 4.64×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。

## 2 资料方法

### 2.1 数据来源

针对黄土高原地区不同年限植被的减水减沙效益,本研究运用 Google 学术搜索和中国期刊全文数据库(CNKI,中国,http://www.cnki.net/),以植被、试验、水土保持或径流等作为关键词初步收集国内公开刊物上发表的大部分有关黄土高原地区坡面植被与产流产沙的实测资料。对于初步收集到的文献中包括植被类型、植被退耕/生长年限、坡面径流量(径流深或径流系数)、坡面侵蚀产沙量(侵蚀模数)、场/次降雨量等数据信息作为有效文献。通过初步收集和简单筛选,共有 18 篇有效文献(重复文献只选用其中 1 篇),将有效文献建立植被恢复年限与坡面产流及坡面产沙的文献数据库资料(表 1)。对收集到的文献进行分类统计,共获得坡面径流泥沙数据 279 个,涉及植被恢复年限范围为 1~18 a,观测时间为 1980—2011 年,检索年限为 1990—2012 年。就文献研究对象而言,各文献均选用了适应黄土高原地区生长的水土保持植物,林地以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)为主,草地以苜蓿(*Medicago sativa*)和沙打旺(*Astragalus laxmannii*)为主,灌木地以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主。根据对现有文献中其他影响因素的描述,涉及坡度因子文献占 81.3%,坡度范围为 5°~27°,15°以上坡面约占 84.6%,在一定程度上涵盖了该区发生水土流失的坡度范围,避免了数据片面性;试验地在地域分布上基本位于黄土丘陵沟壑区,该区为水土流失最严重的区域。

### 2.2 分析方法

为了得到不同恢复年限植被的减水减沙效益,将收集到的文献数据按照林地、草地和灌木 3 种植被类型分别进行分类整理。以每组文献数据作为一个独立的试验结果,对文献中含有裸地对照试验的以裸地径流小区作为对照,没有裸地小区的则以径流泥沙量最大的作为对照。由于不同文献的侧重点不同,且对坡面产流产沙的计量指标(单位)不一,为了便于整合不同文献数据,本研究将各文献试验观测结果统一转化为无量纲减水减沙效益值进行分析。

减水减沙效益的计算方法为:

$$CR_V = \frac{R_{CK} - R_V}{R_{CK}} \times 100\% \quad (1)$$

$$CS_V = \frac{S_{CK} - S_V}{S_{CK}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:CR<sub>V</sub>,CS<sub>V</sub>——植被的减水效益和减沙效益;

$R_V, S_V$ ——植被的产流、产沙指标值;  $R_{CK}, S_{CK}$ ——对应的对照的产流、产沙指标值。其中,  $CR_V, CS_V$  为百分值,  $R_V$  与  $S_V$  以及  $R_{CK}$  与  $S_{CK}$  具有一致的量纲。

为了探讨不同年限植被减水减沙情况, 考虑到不

同文献观测到的径流泥沙数据个数存在一定差异, 综合分析效应值难以求取, 因此, 本研究在对文献数据进行整理后, 以年限为横坐标绘制相应散点图, 定性描述不同恢复年限不同类型植被的减水减沙效益。

表 1 研究数据来源

序号	研究者	研究年份	植被类型	退耕年限/a	试验地	观测时间	小区面积/ $m^2$	最小时间统计量	影响因素			对照
									坡度/ $^\circ$	坡向	盖度/%	
1	罗伟祥等 <sup>[20]</sup>	1990	林	2	永寿	1988	100	次	18	西	100	草地
2	申震洲等 <sup>[21]</sup>	2006	草、灌	7,8	燕沟	2004,2005	32	次	20~23	半阳	>30	裸地
3	余新晓等 <sup>[10]</sup>	1996	林、灌	>7	吉县	1988—1992	100	年	>22	有	>76	裸地
4	周毅等 <sup>[22]</sup>	2011	林、灌	4,5	吴起	2009,2010	无	年	17	有	44,39	草地
5	姜娜等 <sup>[23]</sup>	2011	草、灌	5,15	神木	2004	100	年	11,12	有	20,85	农地
6	闫晓玲 <sup>[24]</sup>	2012	草	1,2	南小河沟	2010,2011	100	次	5	无	无	荒草地
7	陈云明等 <sup>[25]</sup>	2000	林、灌	7	安塞	1999	100	年	27	北	25,90	荒坡
8	赵护兵等 <sup>[26]</sup>	2006	林、草、灌	11,5,10	安塞	2003	100	次	24	东、北	无	农地
9	王青杵等 <sup>[27]</sup>	2012	林、草、灌	1~5	阳高	2005—2009	100	年	8	无	无	裸地
10	张启民等 <sup>[28]</sup>	1998	草	1~3	离石	1986	59	年	28	东	无	裸地
11	吴钦孝等 <sup>[29]</sup>	2002	灌	2~8	宜川	1988—1994	100	年	无	无	无	农地
12	胡梦瑀 <sup>[30]</sup>	2003	灌	2~11	安塞	1993—2002	无	年	27	北	85	撂荒地
13	徐佳等 <sup>[31]</sup>	2012	草、灌	>7	燕沟	2004—2008	32	年	20~23	西南	>40	裸地
14	刘晓峰 <sup>[32]</sup>	2009	草	1~3	安家沟	2007	140	年	20	无	无	未描述
15	侯喜禄等 <sup>[33]</sup>	1996	林、灌	1~8	安塞	1987—1994	无	年	无	无	无	农地
16	侯喜禄等 <sup>[11]</sup>	1990	林、草	1~15	安塞	1980—1989	100	年	27	有	有	农地
17	张津涛等 <sup>[34]</sup>	1993	灌	6	吉县	1988	100	次	28	东北	95	农地
18	张建军等 <sup>[35]</sup>	1996	灌	>7	吉县	1993	100	次	>24.5	北	无	草地

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被减水减沙效益分析

3.1.1 林地的减水减沙效益 根据对所收集文献的径流、泥沙指标值的计算, 得到不同年限林地植被的减水减沙效益(图 1)。分析发现, 在林地植被恢复前 5 a 内, 由于林地植被处于恢复初期, 土壤表层受到较多的栽植扰动导致土壤较为松散, 同时林地未完全郁闭, 使其减水减沙效益较不稳定且存在负值(为了便于作图描述, 植被恢复前 5 a 内根据相关文献中径流泥沙观测值计算得到的  $CR_V, CS_V$  值若为负值均记为 0, 分布于横坐标轴上, 下文同)。6~15 a 生林地减水

减沙效益明显优于幼林, 减沙效益基本保持在 80% 以上, 这可能是由于林地已经郁闭成林并发挥有效的截流能力。同时, 随着林龄的增加, 生态恢复促进了枯枝落叶层的发育<sup>[29]</sup>, 由于林地枯落物具有蓄水、减蚀作用和保护地表等功能, 有效地起到了增加降雨入渗、减缓地表径流、增强土壤抗冲能力等水土保持作用<sup>[36]</sup>。

对于干旱半干旱的黄土高原地区而言, 林木生长常受到水分匮乏的限制, 根据文献对所研究林地水分亏缺值的计算, 确有一定程度的亏缺<sup>[10]</sup>, 这也在一定程度上解释了 16~18 a 生林地植被减水率出现明显下降的原因。

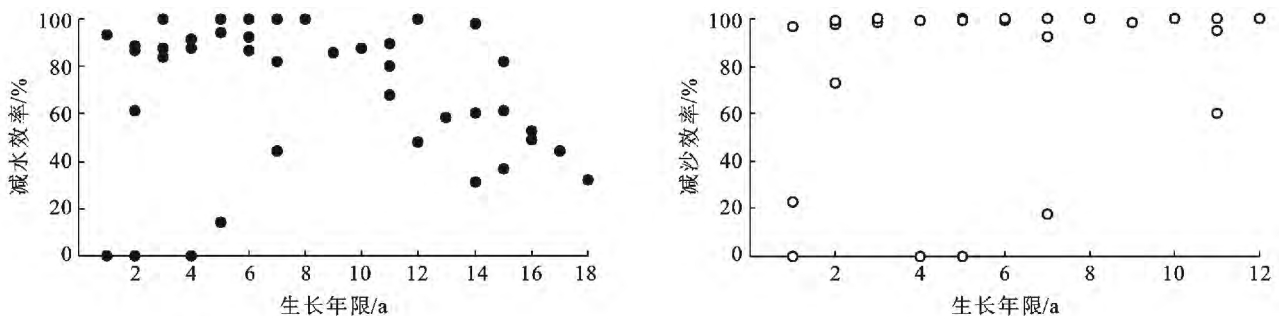


图 1 不同生长年限林地减水减沙效益

3.1.2 草被的减水减沙效益 草本植被在黄土高原生态环境建设中具有不可替代的作用。按照草地植被的生长年限对其减水减沙效益进行了分析。不同恢复年限下草被减水减沙效益见图 2。可以看出,坡面草地减水减沙效益以第 4 年为分界,对可分析数据的极值进行比较,无论是减水效益还是减沙效益,不

同观测试验结果间 1~3 年生草地植被减水减沙效益差异较大,在一定程度上是由于生长初期栽植活动扰动和草地恢复程度的影响。与减水效益相比,1~3 年生草地植被的减沙效益较高,随着草地植被的生长,4 年生以上草地植被减沙效益逐渐趋于稳定,达到 80% 以上。

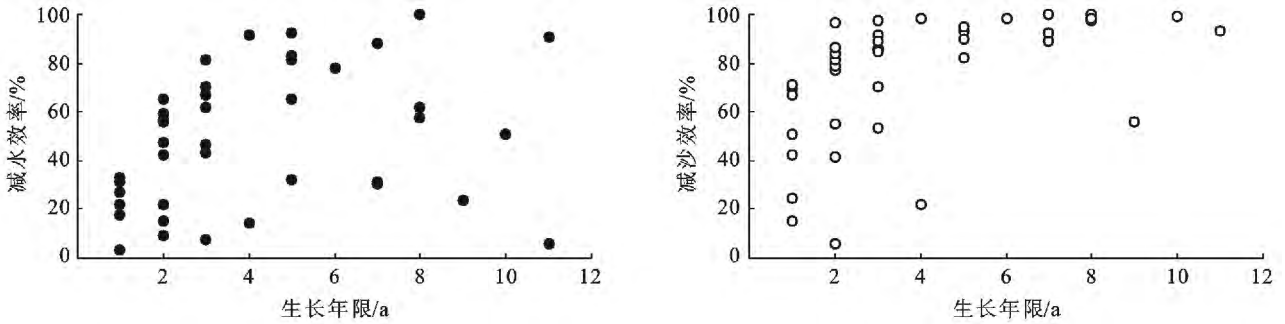


图 2 不同生长年限草地减水减沙效益

3.1.3 灌木地减水减沙效益 不同恢复年限灌木林地减水减沙效益也呈现阶段性变化(图 3)。1~5 年生刚栽植灌木林地,地表受栽植活动等人类经营活动的扰动,有可能导致水土流失增加<sup>[37]</sup>,难以起到理想的减水减沙效果。5~10 年生灌木已经郁闭,同时植被恢复使得灌木林地坡面糙率增加,共同对降雨的截流和地表的入渗能力起到促进作用。灌木林下积累的一定数量和厚度的枯枝落叶层<sup>[38]</sup>,大大减少了直接到达林地表层的降雨量,降低了降雨击溅能和径流

冲刷能,使得灌木林地的减水减沙效益增强并趋于稳定<sup>[39]</sup>。

随着灌木林地的生长,立地条件(土壤持水特征)也发生了一定程度的变化,有研究发现,不同灌木林下土壤水分匮乏和干化严重<sup>[40-41]</sup>,难以提供灌木正常生长所需水分,使得多年生灌丛出现枯梢现象,截流能力降低。坡面灌木林地的生长使得坡面糙率增加,减缓了坡面径流速度,降低了径流冲刷能,植被的拦沙能力起到了一定促进作用。

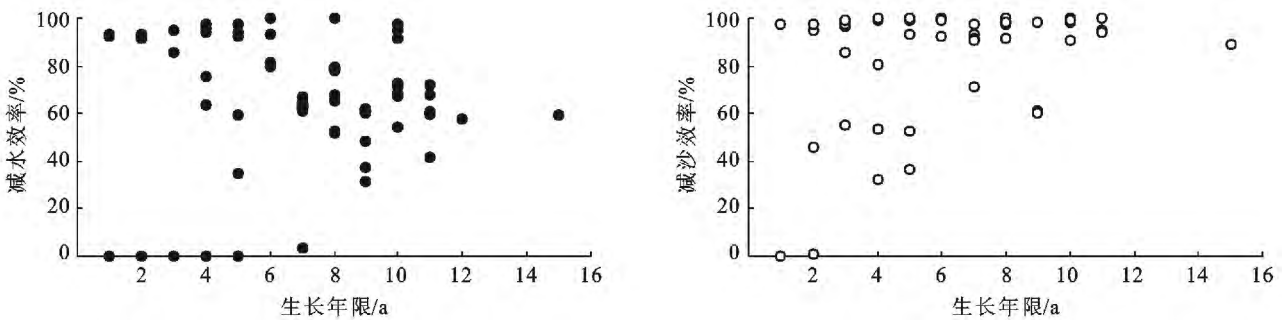


图 3 不同生长年限灌木地减水减沙效益

3.2 植被减水减沙效益阶段性特征

3.2.1 不同年限植被减水减沙效益变化趋势 不同年限植被减水减沙效益值的变异系数(图 4)作为一个统计指标,可以反映植被在发挥水土保持作用上的稳定性,变异系数大时稳定性差。同样,在忽略各试验间差异的前提下,基于植被减水减沙效益值的取平在一定程度上可以整体直观地反映植被在发挥水土保持作用方面的变化趋势。由图 4 可以看出,随着植

被恢复年限的增加,不同试验间植被减水减沙差异逐渐减小且趋于平缓。植被恢复初期,不同试验间减沙效益稳定性优于减水效益,林草植被减水减沙效益稳定上升,5 年生以上植被减水减沙效益值变化趋于平缓。由三次多项式的拟合曲线( $R^2 > 0.6$ )可以看出,随着恢复年限增加林草植被的减水效益会有所降低但最终趋于稳定,而减沙效益在林草植被郁闭成林以后基本稳定并呈现略微上升的趋势。植被所发挥的

水土保持效益出现的差异性趋势,在一定程度上是由于林草植被的截流能力减弱,地上枯落物的增加改变

了土壤表层的理化性质,增强了土壤抗蚀性,对植被拦沙能力具有一定促进作用。

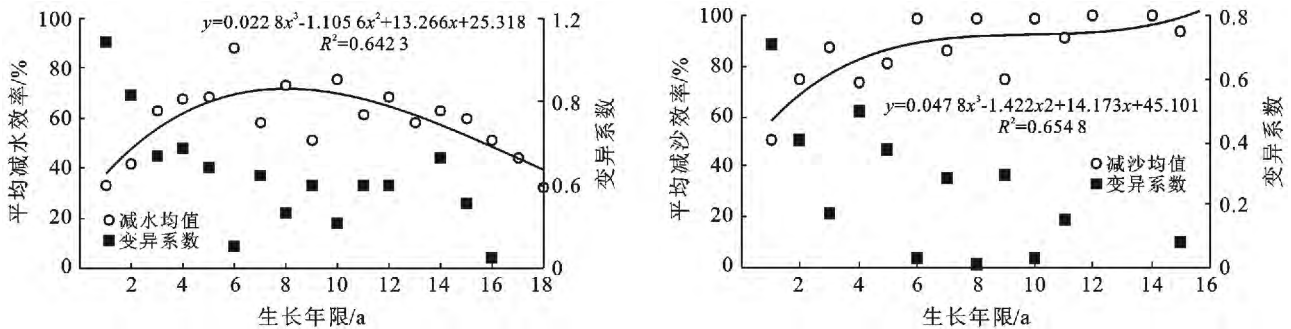


图 4 不同生长年限林草植被减水减沙效益值统计特征

**3.2.2 植被减水减沙效益阶段性特征** 结合前文分析结果可以看出,植被恢复所发挥的减沙效益明显高于减水效益。按照植被减水减沙效益变化趋势及主要影响因素而言,植被恢复大致可以分为 3 个阶段:栽植扰动阶段、水土保持阶段、水分限制阶段。植被生长初期,栽植活动对土壤表层的扰动较大,植被覆盖度取决于种植密度,对降雨的截留能力时高时低,甚至不能起到减水减沙作用。随着植被恢复年限的增加,林草植被达到郁闭状态,截流能力趋于稳定。同时,地表枯落物也逐渐加厚,在一定程度上起到了减能作用,降低了降雨击溅和径流冲刷对地表所产生的侵蚀能,减沙效益基本稳定在 80% 以上。黄土高原地区属于干旱半干旱地区,水资源严重匮乏,加之由于植被恢复造成的表层干化,严重限制林草植被的生长,植被截流能力减弱,进而影响植被减水减沙效益,受林地枯落物的影响,该阶段减沙能力减弱。总之,受不同限制因素的影响,不同阶段植被所发挥的减水减沙效益具有相应的特征。对于黄土高原地区而言,受区域气候特征和土壤理化性状等限制因素的制约,合理的栽植活动、选用耐旱性水土保持植被和适当的经营管理是进一步减少该区土壤侵蚀的有效途径。

## 4 结论

地表径流是降水与下垫面因素综合影响的结果,地表产流产沙情况可以作为衡量地形因子和植被覆盖情况等对坡面水土流失影响的参考指标。随着植被恢复年限的增加,林分的结构、覆盖度以及枯枝落叶层的厚度均发生相应的变化,其水土保持功能也就产生差异<sup>[16]</sup>。本文通过对可收集到文献数据的整合分析,初步得出黄土高原地区不同恢复年限林草植被的减水减沙效益特征。

(1) 与对照相比,黄土高原地区植被恢复所产生的减水减沙效益明显,减沙效益大于减水效益。4 年生以上草地植被和 5 年生以上林灌植被可以发挥稳定的减水减沙效益,减沙效益基本稳定在 80% 左右。

(2) 受栽植扰动、林下枯落物、土壤水分等限制因素的影响,植被减水减沙效益特征大致可以分为 3 个不同恢复阶段:栽植扰动阶段、水土保持阶段、水分限制阶段。因此,合理的林草抚育管理可以减少黄土高原地区水土流失。

对不同年代、不同径流小区的试验观测数据进行整合分析,可以较客观地反映不同恢复年限植被减水减沙效益,有效避免片面结论的产生<sup>[42]</sup>,也可为研究生态水文演变过程提供理论基础。

### [参 考 文 献]

- [1] 冯浩,吴淑芳,吴普特,等. 草地坡面径流调控放水试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 23-25.
- [2] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [3] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [4] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Wen Zhongming, et al. Soil erosion, conservation and eco-environmental changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [5] Zheng Fenli. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 420-427.
- [6] 艾宁,魏天兴,朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 26-30.
- [7] 李斌,张金屯. 不同植被盖度下的黄土高原土壤侵蚀特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 241-244.

- [8] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
- [9] 潘成忠,上官周平.不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J].水科学进展,2007,18(4):490-495.
- [10] 余新晓,陈丽华.黄土地区防护林生态系统水量平衡研究[J].生态学报,1996,16(3):238-245.
- [11] 侯喜禄,曹清玉.陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J].水土保持通报,1990,10(2):33-40.
- [12] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区不同降雨格局下土地利用的水土流失效应[J].水土保持通报,2006,26(6):19-23.
- [13] Mu Xingmin, Zhang Lu, McVicar T R. Estimating the impact of conservation measures on stream-flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Progress, 2007,21(16):2124-2134.
- [14] 穆兴民,王飞,李靖,等.水土保持措施对河川径流影响的评价方法研究进展[J].水土保持通报,2004,24(3):73-78.
- [15] 高鹏,穆兴民,刘普灵,等.降雨强度对黄土区不同土地利用类型入渗影响的试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):1-5.
- [16] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东.持续提高黄土高原植被水土保持功能的配套技术(I):森林保持水土的条件[J].农村生态环境,2002,18(2):50-52.
- [17] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [18] 赵鸿雁,吴钦孝,陈云明.黄土高原不同处理人工油松林地水土流失研究[J].西北农林科技大学学报,2002,30(6):171-173.
- [19] Lu Yihe, Fu Bojie, Feng Xiaoming, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. PLoS One, 2012,7(2):1-10.
- [20] 罗伟祥,白立强,宋西德,等.不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J].水土保持学报,1990,4(1):30-35.
- [21] 申震洲,刘普灵,谢永生,等.不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):6-9.
- [22] 周毅,魏天兴,解建强,等.黄土高原不同林地类型水土保持效益分析[J].水土保持学报,2011,25(3):12-16.
- [23] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [24] 闫晓玲.黄土高塬沟壑区两种牧草蓄水保土效果试验[J].人民黄河,2012,34(4):81-83.
- [25] 陈云明,侯喜禄,刘文兆.黄土丘陵半干旱区不同类型植被水保生态效益研究[J].水土保持学报,2000,14(3):57-61.
- [26] 赵护兵,刘国彬,曹清玉,等.黄土丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J].水土保持学报,2006,20(1):20-24.
- [27] 王青杵,王改玲,石生新,等.晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):71-74.
- [28] 张启民,张文婷.晋西黄土丘陵沟壑区几种优良牧草水土保持效益的研究[J].山西水土保持科技,1998(4):13-15.
- [29] 赵陟峰,赵廷宁,叶海英,等.晋西黄土丘陵沟壑区刺槐人工林枯落物水文特性[J].水土保持通报,2010,30(1):69-73.
- [30] 胡梦珺.黄土丘陵沟壑区沙棘、柠条林地水量平衡及土壤水分生态特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [31] 徐佳,刘普灵,邓瑞芬,等.黄土坡面不同植被恢复阶段的减水减沙效益研究[J].地理科学,2012,32(11):1391-1396.
- [32] 刘晓峰.豆科牧草对黄土丘陵沟壑区退耕地水土流失及土壤养分的影响[J].甘肃科技,2009,25(19):58-61.
- [33] 侯喜禄,白岗栓,曹清玉.黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J].水土保持研究,1996,3(2):98-103.
- [34] 张津涛,张建军,郭小平.晋西黄土残塬沟壑区沙棘生物量及水土保持效益的研究[J].北京林业大学学报,1993,15(4):118-124.
- [35] 张建军,朱金兆,魏天兴.晋西黄土区坡面水土保持林地产生沙的观测分析[J].北京林业大学学报,1996,18(3):14-20.
- [36] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [37] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.不同立地条件下坡面水土流失的差异性试验研究[J].水土保持研究,2010,17(1):222-224.
- [38] 吴钦孝,赵鸿雁.沙棘林的水土保持功能及其在治理和开发黄土高原中的作用[J].沙棘,2002,15(1):27-30.
- [39] 陈云明,陈永勤.人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J].西北植物学报,2003,23(8):1357-1361.
- [40] 霍竹,张斌亮.六道沟小流域主要灌木林地土壤干化研究[J].中国人口·资源与环境,2007,17(5):95-98.
- [41] Wang Shuai, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013,101(2):122-128.
- [42] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. Catena, 2005,61(2):131-154.