

黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征

赵珩钰¹, 曹斌挺², 焦菊英^{1,3†}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 水利部淮河委员会, 233001, 安徽蚌埠;
3. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌)

摘要: 黄土高原地区水土流失造成严重的农业和生态环境问题, 而植被能从根本上控制黄土高原的水土流失。以安塞县典型退耕坡地不同植物群落为研究对象, 采用侵蚀针法, 结合2012—2015年降雨数据及不同植物群落特征的分析, 研究不同植被恢复坡地的土壤侵蚀特征。结果表明: 研究期间, 不同年份植被群落土壤侵蚀强度为丰水年 > 平水年 > 枯水年。不同植被类型群落防治土壤侵蚀的能力不同, 具体为自然恢复灌木群落 > 自然恢复草本群落 > 人工灌木群落 > 人工乔木群落。灰色关联度显示, 降雨量与坡度是影响植被群落土壤侵蚀最重要的因素, 乔灌木群落坡度 > 降雨量, 草本群落降雨量 > 坡度。自然恢复植被群落枯落物盖度 > 植被盖度, 人工植被群落植被盖度 > 枯落物盖度; 因此, 在当前植被条件下, 未受到扰动的群落可有效减少降雨对土壤侵蚀的影响; 在进行植被恢复时, 应优先进行植被自然修复, 适时适地引入乔灌木进行植被恢复人工调控, 尽早促进乔木群落的林下植被发育, 保护其林下灌草层和枯落物层, 同时减少人为干扰。

关键词: 土壤侵蚀; 植被群落; 侵蚀针法; 灰色关联分析; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S157 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2017)03-0105-09

DOI: 10.16843/j.issn.2017.03.014

Characteristics of soil erosion of different plant communities converted from slope cropland in the hilly-gully region of the Loess Plateau

ZHAO Hengkang¹, CAO Binting², JIAO Juying^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;

2. The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources P. R. C. 233001, Bengbu, Anhui, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract [Background] The severe condition of soil and water loss in the Loess Plateau has resulted in critical agricultural and environmental problems. Vegetation restoration plays an essential role in controlling the soil erosion in the Loess Plateau. Yet there were few researches on analyzing the characteristics of soil erosion of different plant communities converted from slope cropland in the region.

[Methods] The research was conducted between 2012 and 2015. Based on the succession of local plants, 10 plant communities on abandoned slope croplands in 4 watersheds of Ansai County were selected and were classified in 4 groups: naturally restored herbage community (*Artemisia scoparia*, *Stipa bungeana*, *Bothriochloa ischaemum*, *Artemisia gmelinii*, and *Artemisia giraldii*), naturally restored shrub community (*Sophora viciifolia*), artificially established shrub community (*Caragana intermedia* and *Hippophae rhamnoides*) and artificially established arbor community (*Robinia pseudoacacia* and *Populus*

收稿日期: 2016-12-08 修回日期: 2017-04-06

项目名称: 国家自然科学基金“黄土丘陵区退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理(41371280)”;水利部公益性行业科研专项经费项目“西北黄土高原区水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045)

第一作者简介: 赵珩钰(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:土壤侵蚀。E-mail: zhkang1024@hotmail.com

†通信作者简介: 焦菊英(1965—),女,研究员,博士生导师。主要研究方向:土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价。

E-mail: jjiao@ms.iswc.ac.cn

simonii). Totally 45 plots were selected and in each of these communities 3–6 plots were selected, in each plot 3 quadrats were placed as repetition. Annual soil erosion intensity was monitored by erosion pins placed in these plots. Characteristics of soil erosion of different plant communities were analyzed with ANOVA, combined with the hydrologic years divided by the characteristics of rainfall. Gray theory was used to determine the influence of potential indices caused soil erosion. [Results] Rainfall in research area was distributed unevenly, and rainfall erosivity was the driver factor causing the differences of soil erosion intensity of plant communities in different years. The ability of controlling soil erosion depended on the species of plant community: naturally restored shrub community ($1\,285.36\text{ t/km}^2$) > naturally restored herbage community ($2\,152.65\text{ t/km}^2$) > artificially established shrub community ($2\,320.50\text{ t/km}^2$) > artificially established arbor community ($2\,661.14\text{ t/km}^2$). The soil erosion intensity of *Robinia pseudoacacia* was the largest ($3\,875.02\text{ t/km}^2$) among these plant communities. Gray correlation analysis revealed that the rainfall and slope gradient had more impact on soil erosion than coverage in all communities. In shrub and arbor communities, the effect of slope gradient > rainfall, but in herbage communities, rainfall > slope gradient. When mentioned coverage, in natural restored community, cover of litters > vegetation cover; and in artificially established community, vegetation cover > cover of litters. [Conclusions] Under current status of vegetation, effects of precipitation on soil erosion reduced effectively in undisturbed plant communities. Natural vegetation should be restored initially with trees and shrubs introduced by human at proper time and place. Meanwhile, the undergrowth vegetation and litters in forest communities should be promoted earlier and protected, meanwhile human disturbances should be reduced as more as possible.

Keywords: soil erosion; plant communities; erosion pin; grey correlation analysis; hilly-gully loess region

黄土高原地区由于其受特殊的地理位置、气候条件、地形地貌、土壤以及人类活动对植被的破坏等多种因素的影响,是中国水土流失最为严重的地区。严重的水土流失导致土地生产力降低;侵蚀泥沙使黄河下游河床不断抬高,淤塞水库河道,引起洪涝灾害,造成严重的农业和生态环境问题。研究^[1]显示,植被能从根本上控制黄土高原的水土流失,有显著的生态环境效应。自20世纪50年代以来,国家对黄土高原实施了一系列的水土流失治理措施——随着退耕还林(草)的持续进行,黄土高原植被盖度增加,土壤养分与物理性质得到改善^[2-3],这对土壤水文特性和土壤侵蚀产生显著的影响^[4]。有关黄土高原退耕地的植被恢复的研究,主要集中在植被特征与恢复演替过程^[5-7],土壤理化特性^[8-10]、土壤微生物^[11-12]、土壤种子库^[13]等方面。虽然现有研究在植被的防蚀机理与功效方面已取得了丰富的成果^[14-16];但主要基于径流小区观测不同植被类型的产流产沙特征,且每种植被类型只涉及1到2种植物群落,样本较少^[17-19],很少涉及退耕地不同植被恢复条件下形成的多种不同植物群落的土壤侵蚀特征,所以,尚不能满意回答退耕还林(草)工程的

减蚀效应。

因此,笔者通过在黄土丘陵沟壑区延河流域典型小流域不同退耕年限、不同退耕方式的典型坡地布设侵蚀针小区,监测土壤侵蚀量,分析现阶段退耕地不同植被恢复条件下多种不同植物群落的土壤侵蚀特征,以期为目前黄土高原退耕还林(草)工程水土保持效益评价和优化配置提供理论参考。

1 研究区概况

延河属于黄河的一级支流,全长286.9 km,流域面积7 725 km²,地处E 108°41′01″~108°27′48″, N 36°27′00″~37°58′39″之间,位于黄土高原中部,属黄土高原丘陵沟壑区,是黄河泥沙的主要来源之一。延河流域属于半干旱大陆性气候,地跨暖温性森林、暖温性森林草原和暖温性典型草原3个地带,年均气温9℃,年降雨量约520 mm,且多集中在6—8月,其降水量占全年的70%,且多暴雨。土壤类型有黄绵土、冲积土、黏土、黑垆土等,分布最广的是黄绵土。植被类型从南向北分为南部刺槐、油松、崂山辽东栎、阔叶—针叶混交林带,中部延安—安塞间为柠条、白羊草草原过渡带,安塞以北为百里香、长芒

草草原带。

2 材料与方法

2.1 样地选择与调查

综合分析本课题组多年在黄土丘陵沟壑区的对植被演替的调查与研究,以及其他学者的研究成果发现:该区植被演替均经历了大体相近的一年生草本群落阶段到多年生蒿禾类草本群落阶段^[20],分布最为广泛的群落主要以猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)为优势种的群落^[21]、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana*

intermedia)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和杨树(*Populus simonii*)是黄土高原人工植被恢复中的主要树种^[22];因此,本研究在陕北黄土高原丘陵沟壑区延河流域森林草原带,依据代表性、相似性和完整性的原则选择陈家川流域、张家河流域、三王沟流域和坊塌流域 4 个小流域,结合 4 个小流域植物群落分布的实际情况,选择以上群落,每种群落选择 3~6 个样地,样地共 45 个,基本信息如表 1 所示。每个样地设 3 个样方重复,样方大小为乔木 10 m × 10 m,灌木 5 m × 5 m,草本 2 m × 2 m,调查记录样方内出现的物种及其数量、高度、冠幅、盖度和植被总盖度。由于 2012 年为预实验,故未在猪毛蒿、长芒草、白羊草群落设置样地。

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of studied plots

退耕方式 Way of returning farmland	退耕年限 Years of returning farmland/a	植物群落 Plant communities	样地数 Number of plots	坡度 Slope gradient	盖度 Coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass/(g·m ⁻²)	未破坏的监测小区数量 Undisturbed monitoring erosion plots			
							2012	2013—2014	2015	2012—2015
自然恢复草本 Naturally re-stored herbage community	3~7	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	5	26.5	20.1	26.4	-	9	13	31
	6~10	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	3	24.8	22.9	66.7	-	15	9	39
	15~25	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemun</i>	5	27.8	20.8	97.7	-	9	12	30
	30	芨蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	3	32.1	35.5	109.6	9	11	9	38
	20~40	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	6	26.7	39.0	126.7	38	25	47	136
自然恢复灌木 Naturally re-stored shrub community	40	狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>	3	30.8	70.0	224.7*	9	9	9	36
人工灌木 Artificially established shrub community	25	柠条 <i>Caragana intermedia</i>	5	29.6	51.4	182.6*	14	9	18	50
	30	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	3	29.5	57.5	257.3*	12	32	6	77
人工乔木 Artificially established arbor community	8~20	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	6	26.2	60.0	35.5*	39	34	30	131
	15	杨树 <i>Populus simonii</i>	3	32.8	57.6	72.0*	9	9	9	36

注: * 代表林下草本层生物量。Note: * represents the biomass of undergrowth herbage.

2.2 侵蚀针布设及侵蚀量计算

根据样地的大小布设 3~9 个规格 2 m × 2 m 的侵蚀针观测小区,每个小区均匀布设 9 根侵蚀针,在尽量不破坏小区内的表层土壤状况下,记录每个小区的植被类型、坡度、坡向、海拔等信息。雨季结束后,对侵蚀针进行量测。采用环刀法测定侵蚀针小区的土壤密度,每个小区取 3 个重复。土壤侵蚀量计算采用黄炎和等^[23]的方法,计算不同小区的土壤侵蚀强度。监测时间为 2012—2015 年,因自然或人

为等不可控因素对侵蚀针小区的破坏,使得小区数量减少,各年份未破坏的小区数量见表 1。

2.3 降雨资料收集

实验期间,安塞县年日降雨数据来源于陕西省水利厅网站和中国科学院安塞水土保持试验站的山地和川地气象监测点。依据国家气象局颁布的 GB/T 28592—2012《降水量等级》,划分雨量标准。降雨侵蚀力采用章文波等^[24]通过日雨量(日雨量 > 12 mm)计算降雨侵蚀力的模型。降水年型划分采用陶

林威等^[25]的标准。统计和分析安塞县在本研究期间(2012—2015)5—10月的降雨特征和安塞县多年(1971—2015)5—10月的降雨特征。

2.4 数据分析方法

采用 Excel 2013 与 SPSS 22.0 分析数据:划分水文年,计算降雨侵蚀力;运用单因素方差分析比较不同年份、不同植物群落之间年土壤侵蚀强度的差异;采用灰色关联法^[26]计算不同水文年不同因素对土壤侵蚀模数的关联度。

3 结果与讨论

3.1 降雨变化特征

研究期间,安塞县降雨主要集中在6—9月(图1),占总降雨量的57.09%。降雨量变异系数为42.0%。2013年降雨量最大,达到880.2 mm。依据降水年型划分标准,2013和2014年为丰水年,其中2013年是安塞县历史上降雨最多的年份;2012年为平水年;2015年为枯水年。安塞县年降雨时间的年际变化较大,变异系数为23.7%,2014年降雨时间最长(114 d),2012年最短(63 d)。2014年降雨时

间是安塞县历史上降雨时间最长的年份,安塞县丰水年的降雨侵蚀力高于平水年,远高于枯水年,侵蚀性降雨主要发生于7—9月。丰水年侵蚀性降雨占总降雨量70%以上,最长达77.91%;枯水年为27.66%(表2)。各年降雨侵蚀力的巨大差距造成不同年份土壤侵蚀量的差异,植物群落的土壤侵蚀强度表现为丰水年>平水年>枯水年(表3)。

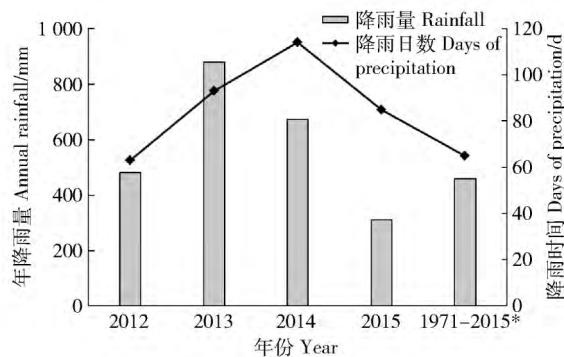


图1 安塞县年降雨量与降雨时间(*代表多年平均值)

Fig. 1 Annual rainfall and days of precipitation in Ansai County (* means the average of multiple years)

表2 2012—2015年月降雨侵蚀力、降雨量与降雨时间

Tab. 2 Monthly rainfall erosivity, rainfall and days of precipitation during 2012 - 2015

年份 Year	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	全年 Annual	侵蚀性降雨量占年降雨量比/% Ratio of erosive rainfall to annual rainfall
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity/(MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)								
2012	39.9	250.2	520.0	442.7	144.1	0.0	1396.9	71.56
2013	0.0	415.7	3904.7	1156.1	441.6	0.0	5918.0	77.91
2014	113.5	475.2	832.0	900.5	531.8	0.0	2853.0	72.53
2015	0.0	0.0	25.9	83.7	44.0	60.5	214.2	27.66
降雨量 Rainfall/mm								
2012	38.6	97.4	139.6	112.1	84.2	8.3	480.2	
2013	20.4	98.7	487.3	153.9	93.9	26	880.2	
2014	41.8	109.8	164.7	179.4	157.8	19	672.5	
2015	24.3	34.9	42.9	80.7	76.3	51.1	310.2	
1971—2015	40.5	64.9	121.3	115.3	82.8	32.6	457.4	
降雨时间 Days of precipitation/d								
2012	7	9	15	12	14	6	63	
2013	12	17	24	13	17	10	93	
2014	10	14	21	28	26	15	114	
2015	15	13	8	20	19	10	85	
1971—2015	7.8	9.8	13.4	13.6	12.5	8	65.1	

3.2 不同植物群落土壤侵蚀变化特征

研究期间,不同植物群落的年均土壤侵蚀模数

为878.15~5099.71 t·(km²·a)⁻¹,具体为自然恢复灌木群落<自然恢复草本群落<人工灌木群落<人

工乔木群落(表 3);刺槐群落由于受到干扰,为中度侵蚀,在平水年与丰水年土壤侵蚀强度显著大于其他植物群落,其他植物群落中土壤侵蚀强度之间差异不显著。在枯水年,不同植物群落的土壤侵蚀强度之间差异不显著,刺槐群落的土壤侵蚀强度最大,为中度侵蚀。

同一种植物群落不同年份表现为:6 种自然恢复植物群落的 2012—2015 年均土壤侵蚀强度为 1 187.11 ~ 2 866.87 t/km²(表 3)。除铁杆蒿群落外,其余群落不同降雨年份的年土壤侵蚀强度间的差异均不显著。4 种人工乔灌群落的 2012—2015 年均土壤侵蚀强度在 1 228.13 ~ 3 875.02 t/km²之间,为轻度或中度侵蚀(表 3)。除杨树群落外,其余群落的土壤侵蚀模数变化显著。

因此,不同植被类型群落防治土壤侵蚀的能

力不同。相比人工乔灌木群落,自然恢复植物群落更能有效控制坡地土壤侵蚀,其中自然恢复灌木群落优于草本群落。可能因为人工乔木群落消耗大量水分,形成土壤干层^[27],导致植被生长发育不良,林下的灌木草本稀疏,覆盖度差,不能有效拦截降雨;另一方面调查中的刺槐离居民居住区近,是村民的主要用柴林,植被调查中发现刺槐林下植被盖度较低(21.5%),不仅低于杨树群落林下植被(28.2%),也低于灌木群落(28.8%)与草本群落(33.7%);其林下植被生物量也小于其他群落(表 1)。村民对刺槐林乔木和林下植被的扰动,也破坏表层土壤完整的土壤结构,加剧土壤侵蚀的发生;因此保护人工乔木林的完整性,减少人为对土壤的扰动,是减少土壤侵蚀的有效途径。

表 3 2012—2015 年不同植物群落土壤侵蚀模数
Tab. 3 Soil erosion intensity of different plant communities in 2012 - 2015

退耕方式 Way of returning farmland	植被 Vegetation	土壤侵蚀模数 Soil erosion intensity				平均 Average
		2012	2013	2014	2015	
自然恢复草本 Naturally restored herbage community	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	—	3 354.42ABa	3 111.18ABa	1 647.12Aa	2 866.87
	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	—	4 408.31ABa	4 047.18ABa	1 147.23Aa	2 566.66
	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemun</i>	—	1 897.91ABa	1 780.81ABa	1 053.24Aa	1 446.30
	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	1 598.43BCb	2 410.48ABa	1 350.89Bb	1 109.00Ab	1 538.12
	茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	878.15Ca	1 684.13Ba	993.88Ba	1 054.21Aa	1 187.11
自然恢复灌木 Naturally restored shrub community	狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>	1 441.68BCa	1 161.24Ba	1 154.68Ba	1 226.07Aa	1 228.13
人工灌木 Artificially established shrub community	柠条 <i>Caragana intermedia</i>	2 889.12ABa	1 961.36ABab	2 695.89ABa	1 156.86Ab	2 056.12
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	2 712.82ABa	3 237.11ABa	2 256.07ABab	1 022.88Aa	2 635.87
人工乔木 Artificially established arbor community	杨树 <i>Populus simonii</i>	1 971.58ABCa	1 396.71Ba	1 504.81ABa	1 245.82Aa	1 543.42
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	3 576.75Aab	5 099.71Aa	4 309.65Aab	2 191.21Ab	3 875.02
平均 Average		2 152.65	2 661.14	2 320.50	1 285.36	

注:表中大写字母表示同一年份不同植物群落间的差异性($\alpha=0.05$),小写字母表示同一植物群落不同年份间的差异性($\alpha=0.05$)。Note: Uppercase in table represents the difference between different plant communities in the same year ($\alpha=0.05$), while lowercase represents the difference of the same plant community between different years ($\alpha=0.05$).

3.3 不同因素对土壤侵蚀的影响

根据灰色关联度大小(表 4),自然恢复草本群落 2013—2015 年各因素对土壤侵蚀的影响为降雨量 > 坡度 > 枯落物盖度 > 降雨侵蚀力 > 草本盖度。坡度的影响随着降水的减少而小于降水,其余因素顺序不变。

自然恢复灌木群落 2013—2015 年各因素的影响为坡度 > 降雨量 > 枯落物盖度 > 草本盖度 > 灌木盖度 > 降雨侵蚀力。灌木盖度的影响随降水减少而小于草本盖度,其余因素顺序不变。

人工灌木群落 2013—2015 年各因素的影响为坡度 > 降雨量 > 降雨侵蚀力 > 草本盖度 > 灌木盖度 > 枯落物盖度。2013—2014 年草本盖度的影响随降水减少而小于枯落物盖度,其余因素顺序不变(2015 年枯落物盖度 > 降雨量 > 草本盖度)。

人工乔木群落 2013—2015 年各因素的影响为坡度 > 降雨量 > 乔木盖度 > 枯落物盖度 > 草本盖度 > 降雨侵蚀力。

在枯水年,自然恢复草本群落中结皮盖度的影响大于枯落物盖度与植被盖度,其余群落中结皮是

最不重要的影响因素。

综上,降雨量与坡度一同改变径流特性^[28-30],是影响不同植被群落类型土壤侵蚀最重要的因素。由于草本植被只有一层草冠拦截雨滴,其根系对土壤侵蚀影响较大^[31-32];而生长茂密的乔灌木植被的林冠层及林下植被更能减弱雨滴击溅与径流对土壤的影响^[33],使乔灌木群落中坡度 > 降雨量,草本群落反之。在自然恢复植被群落中,枯落物的影响较植被盖度更大,因自然恢复植被群落表层土壤结构

良好,茂密的林下植被产生较多枯落物,减少径流^[34];而人工乔灌木由于受到扰动,林下植被与枯落物被破坏,减弱其对土壤侵蚀的控制;因此,林下植被及地表覆盖较单纯的林冠覆盖更重要。结皮方面,只有自然恢复草本群落中结皮有较大影响,可能因为草本植物冠层相对较小,结皮覆盖的地表起到有效的补充作用;而乔灌木除最上层林冠外,林下植被可进一步拦截雨滴,且枯落物相对较多,相对减弱了结皮的作用。

表4 2013—2015年不同植被群落土壤侵蚀模数影响因素的灰色关联度

Tab.4 Gray correlations of different factors that influence the soil erosion intensity of different vegetation communities 2013–2015

植被类型 Type of vegetation	年份 Year	坡度 Slope gradient	乔木盖度 Coverage of trees	灌木盖度 Coverage of shrub	草本盖度 Coverage of herbage	枯落物盖度 Coverage of litters	结皮盖度 Coverage of soil crust	降雨量 Rainfall	降雨侵蚀力 Rain erosivity
自然恢复草本 Naturally restored herbage community	2013	0.814			0.745	0.778		0.797	0.797
	2014	0.818			0.801	0.805		0.818	0.818
	2015	0.744			0.731	0.742	0.743	0.785	0.785
	2013—2015	0.841			0.811	0.818		0.851	0.816
自然恢复灌木 Naturally restored shrub community	2013	0.680		0.632	0.631	0.659		0.679	0.679
	2014	0.680		0.640	0.643	0.664		0.672	0.672
	2015	0.674		0.671	0.673	0.699	0.343	0.674	0.674
	2013—2015	0.687		0.638	0.645	0.647		0.651	0.610
人工灌木 Artificially established shrub community	2013	0.694		0.648	0.660	0.642		0.668	0.668
	2014	0.742		0.695	0.706	0.702		0.729	0.729
	2015	0.819		0.747	0.756	0.813	0.745	0.803	0.803
	2013—2015	0.746		0.704	0.709	0.685		0.741	0.717
人工乔木 Artificially established arbor community	2013	0.803	0.760		0.703	0.721		0.781	0.781
	2014	0.717	0.709		0.680	0.704		0.687	0.687
	2015	0.837	0.803		0.776	0.788	0.749	0.823	0.823
	2013—2015	0.819	0.780		0.761	0.766		0.813	0.750

4 结论

1) 研究期间,安塞县降雨量年内分配不均,不同水文年降雨量、年降雨日数差异巨大,是造成不同水文年植被群落土壤侵蚀强度差异的动力因素。

2) 不同植被类型群落防治土壤侵蚀的能力不同,具体为自然恢复灌木群落 > 自然恢复草本群落 > 人工灌木群落 > 人工乔木群落。刺槐群落的乔木和林下植被由于受到人为干扰,土壤侵蚀强度最大,为中度侵蚀。在当前植被条件下,若没有受到人为干扰,自然恢复植被群落可有效减少降雨对土壤侵蚀的影响。

3) 降雨量与坡度是影响植被群落土壤侵蚀最

重要的因素,其中乔灌木群落坡度 > 降雨量 > 盖度,草本群落降雨量 > 坡度 > 盖度。盖度方面,在自然恢复植被群落中,枯落物盖度 > 植被盖度,人工植被群落中植被盖度 > 枯落物盖度。因此,在黄土丘陵沟壑区继续推行退耕还林(草)是有效控制土壤侵蚀的主要途径,应优先进行植被自然修复,适时适地引入乔灌木进行植被恢复人工调控,尽早促乔木林郁闭及林下植被的发育,保护林下灌草层和枯落物层,并加大对已退耕还林(草)地的保护力度,减少人为侵蚀。

5 参考文献

[1] 陈浩,蔡强国. 坡面植被恢复对沟道侵蚀产沙的影响

- [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(1): 69.
CHEN Hao, CAI Qiangguo. 坡面植被恢复对沟道侵蚀产沙的影响[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 36(1): 69.
- [2] QIU L P, ZHANG X C, CHENG JM, et al. Effects of 22 years of revegetation on soil quality in the semi-arid area of the Loess Plateau [J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(24): 6896.
- [3] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resource Research, 2001, 37(3): 701.
- [4] LIU Y, FU B, LYU Y, WANG Z, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 404.
- [5] 王晶, 朱清科, 秦伟, 等. 陕北黄土区封禁流域坡面微地形植被特征分异[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 694.
WANG Jin, ZHU Qingke, QIN Wei, et al. Differentiation of vegetation characteristics on slope micro-topography of fenced watershed in loess area of North Shaanxi Province, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 694.
- [6] 王世雄, 王孝安, 郭华. 黄土高原植物群落演替过程中的 β 多样性变化[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1135.
WANG Shixiong, WANG Xiaohan, GUO Hua. Change patterns of β -diversity in the succession process of plant communities on the Loess Plateau of Northwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1135.
- [7] 焦菊英, 张振国, 贾燕锋, 等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2981.
JIAO Juying, ZHANG Zhenguo, JIA Yanfeng, et al. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of North Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 2981.
- [8] 赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 123.
ZHAO Dong, XU Mingxiang, LIU Guobin, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different re-vegetation types using micro-computed topography [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 123.
- [9] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 等. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3216.
FENG Tianjiao, WEI Wei, CHENG Liding, et al. Effects of land preparations and vegetation types on soil chemical features in a loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3216.
- [10] 刘文祥, 李勇, 于寒青. 草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性: 退耕年限的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 164.
LIU Wenxiang, LI Yong, YU Hanqing. Soil water stable aggregates and carbon and nitrogen storage enhanced by conversion of farmland to shrub and grass in China Loess Plateau: the influence of conversion cultivation time [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 164.
- [11] 刘洋, 黄懿梅, 曾全超. 黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究[J/OL]. 环境科学, 2016(10): 11 [2016-12-02]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20160929.1347.035.html>.
LIU Yang, HUANG Yimei, ZENG Quanchao. Soil bacterial communities under different vegetation types in the Loess Plateau [J/OL]. Environmental Science, 2016, (10): 11 [2016-12-02]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1895.X.20160929.1347.035.html>.
- [12] 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5608.
XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al. Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5608.
- [13] 胡安, 陈皓, 陈先江, 等. 黄土高原农田与草原土壤种子库[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1035.
HU An, CHEN Hao, CHEN Xianjiang, et al. Soil seed banks of cropland and rangeland on the Loess Plateau [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(7): 1035.
- [14] 朱智勇, 解建仓, 李占斌, 等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 1.
ZHU Zhiyong, XIE Jiancang, LI Zhanbin, et al. Experimental study on mechanism of slope runoff-erosion sediment yield [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2011, 25(5): 1.
- [15] 吕锡芝, 康玲玲, 左仲国, 等. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1113.
LYU Xizhi, KANG Lingling, ZUO Zhongguo, et al. Characteristics of slope runoff under different vegetation

- conditions in Lüergou Watershed of the Loess Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1113.
- [16] 易婷,张光辉,王兵,等. 退耕草地近地表层特征对坡面流速的影响[J]. *山地学报*, 2015, 33(4): 434.
YI Ting, ZHANG Guanghui, WANG Bing, et al. Effects of near soil surface characteristics on velocity of overland flow in a natural succession grassland [J]. *Mountain Research*, 2015, 33(4): 434.
- [17] 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.
LIU Dong, LIU Puling, DENG Ruifen, et al. Erosion characteristics of plots with various underlying surfaces in single rainfall [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(2): 99.
- [18] 杨春霞,肖培青,甄斌,等. 野外不同被覆坡面产流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 28.
YANG Chunxia, XIAO Peiqing, ZHEN Bin, et al. Characteristics on runoff and sediment yield in field prototype and different coverage slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 28.
- [19] 徐佳,刘普灵,邓瑞芬,等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J]. *地理科学*, 2012, (11): 1391.
XU Jia, LIU Puling, DENG Ruifen, et al. Runoff and sediment reductions in the different stages of vegetation restoration on a loess slope [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, (11): 1391.
- [20] 秦伟,朱清科,张宇清,赵磊磊. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. *应用生态学报* 2009, 20(2): 403.
QIN Wei, ZHU Qingke, ZHANG Yuqing, et al. Dynamics of plant community species diversity in the process of ecological rehabilitation in North Shaanxi loess area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 403.
- [21] 焦菊英,张振国,贾燕锋,等. 陕北丘陵沟壑区撂荒地自然恢复植被的组成结构与数量分类[J]. *生态学报* 2008, 28(7): 2981.
JIAO Juying, ZHANG Zhenguo, JIA Yanfeng, et al. Species composition and classification of natural vegetation in the abandoned lands of the hilly-gullied region of North Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2008, 28(7): 2981.
- [22] 仝小林,李卫忠. 延安市退耕还林工程林种、树种组成分析研究[J]. *陕西林业科技*, 2007. 2: 18.
TONG Xiaolin, LI Weizhong. Research on forest category and species composition in the conversion of cropland to forest project in Yan'an Prefecture [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2007, 2: 18.
- [23] 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.
HUANG Yanhe, CHEN Minghua, HUANG Xinquan. 土壤侵蚀量的标签定位测定法初探 [J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 1998(2): 51.
- [24] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 35.
ZHANG Wenbo, FU Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. *Resources Science*, 2003, 25(1): 35.
- [25] 陶林威,马洪,葛芬莉. 陕西省降水特性分析[J]. *陕西气象*, 2000(5): 6.
TAO Winwei, MA Hong, GE Fenli. 陕西省降水特性分析 [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2000(5): 6.
- [26] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987: 33.
DENG Julong. The primary methods of grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1987: 33.
- [27] 白文娟,焦菊英,马祥华,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工林的土壤环境效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(7): 135.
BAI Wenjuan, JIAO Juying, MA Xianghua, et al. Soil environmental effects of artificial woods in abandoned croplands in the loess hilly-gullied region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(7): 135.
- [28] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 147.
LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 147.
- [29] 潘成忠,上官周平. 降雨和坡度对坡面流体力学参数的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(6): 843.
PAN Chengzhong, SHANGGUAN Zhouping. Experimental study on influence of rainfall land slope gradient on overland shallow flow hydraulics [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(6): 843.
- [30] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162.

- SHEN Haiou , ZHENG Fenli , WEN Leilei , et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2015 , 46 (7) : 162.
- [31] 杨帆 程金花 张洪江 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究 [J]. 农业机械学报, 2016 , 47(5) : 129.
- YANG Fan , CHENG Jinhua , ZHENG Hongjiang , et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2016 , 47(5) : 129.
- [32] 李鹏, 李占斌, 鲁克新. 黄土区草本植被根系与土壤垂直侵蚀产沙关系研究 [J]. 植物生态学报, 2006 , 30(2) : 302.
- LI Peng , LI Zhanbin , LU Kexin. Relationship between herbaceous root system and vertical soil sediment yield in loess area [J]. Journal of Plant Ecology , 2006 , 30 (2) : 302.
- [33] 吴光艳, 成婧, 祝振华, 等. 黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析 [J]. 水土保持研究, 2011 , 18(4) : 32.
- WU Guangyan , CHENG Jing , ZHU Zhenhua , et al. Rainfall characteristics under canopy of plantation forest in the southern Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation , 2011 , 18(4) : 32.
- [34] 王冬, 杨政, 郝红敏 等. 黄土区退耕草地凋落物-土壤界面水分过程特征研究析 [J]. 水土保持研究, 2015 , 22(1) : 80.
- WANG Dong , YANG Zheng , HAO Hongmin , et al. Hydrological processes of litter-soil interfacial systems in restoration grasslands of the loess region [J]. China. Research of Soil and Water Conservation 2015 , 22(1) : 80.