

黄土丘陵沟壑区抵抗土壤侵蚀的植物群落结构特征

寇萌^{1,2}, 焦菊英^{2,3}

(1. 咸阳师范学院 资源环境与历史文化学院, 陕西 咸阳 712000; 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, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:黄土丘陵沟壑区水土流失严重, 植被是防治水土流失的最有效和最根本措施。植物群落在垂直方向上由不同植被层组成, 不同层具有不同的水土保持作用。因此, 恢复具有合理结构与有效盖度的植被是控制该区水土流失、改善生态环境的根本途径。鉴于此, 采用结构化植被因子指数(Cs)分析了不同群落的结构特征, 并结合不同群落土壤侵蚀量的实测数据, 探明了能够抵抗土壤侵蚀的群落结构特征。研究结果表明: 不同水文年群落能有效抵抗土壤侵蚀的Cs值有明显差异, 暴雨年份植物群落有效减少土壤侵蚀所需的Cs值较高。演替早期群落及人工林群落未表现出较强的减蚀能力, 当Cs分别大于20%和30%左右, 且草本层和枯落层盖度较大时, 土壤侵蚀强度小于2500 t/(km²·a), 为轻度侵蚀。演替中、后期群落及自然乔、灌群落Cs分别大于30%和36%, 且近地面的灌木、草本层及贴地面的枯落层中至少有一层盖度较大时, 可有效减少土壤侵蚀, 尤其在暴雨年份, 禾本科植物群落及自然乔、灌群落能有效控制土壤侵蚀。当Cs分别大于38%和30%~40%, 且近地面至少有一层盖度较大时, 土壤侵蚀强度小于黄土高原地区允许土壤流失量[1000 t/(km²·a)]。

关键词:植物群落; 土壤侵蚀; 结构化植被因子指数

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0007-08

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.002

Structure of Erosion-Resistant Plant Community in the Hill-Gully Region of the Loess Plateau

KOU Meng^{1,2}, JIAO Juying^{2,3}

(1. College of Resources & Environment and History & Culture, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The Loess Plateau is well known for its severe soil erosion. Vegetation was the most effective and essential measure to prevent and control soil erosion. Plant communities were composed by different vegetation layers in the vertical direction, and different vegetation layers had different functions for soil and water conservation. Therefore, vegetation with certain vegetation coverage and good structure has the good effects on soil and water conservation, which was the key that vegetation could conserve soil and water. In view of this, the structure vegetation cover index (Cs) was used to analyze the community structure which could resist soil erosion. Plant community structure vegetation cover index and soil erosion data in different plant communities were used to illuminate the community structure index that could indicate the abilities resisting soil erosion. The main results were as follows. The Cs values were obvious difference in different hydrological years. In the year of rainstorm, the communities need to have higher Cs value when it was able to effectively reduce soil erosion. Different communities have their own suitable structure vegetation cover index (Cs). Early succession community and afforestation did not show the strong erosion-resistant, when the Cs were more than 20% and 30%, respectively, and the cover of herb layer and litter layer was higher, the soil

收稿日期: 2017-12-21

修回日期: 2018-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501604); 国家自然科学基金面上项目(41771322)

第一作者: 寇萌(1988—), 女, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与植被恢复研究。E-mail: mengkoumeng@126.com

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 研究员, 博导, 主要从事植被恢复与水土保持环境效应评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswac.ac.cn

erosion intensity was less than $2\ 500\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, it was light erosion. When Cs of mid and late succession communities, and natural tree and shrub communities were more than 30%, and 36% respectively, and at least one of the cover of near surface layers (shrub, herb, litter layer) was higher, these communities could be effective in reducing soil erosion. Especially in the year of rainstorm, Gramineous plant communities, natural tree and shrub communities could effectively control soil erosion. When the Cs of these communities were more than 38% and 30%~40%, respectively, and at least one of the cover of near surface layers was higher, soil erosion intensity was less than soil loss tolerance [$1\ 000\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$] in the Loess Plateau Region.

Keywords: plant community; soil erosion; structure vegetation cover index

黄土丘陵沟壑区位于半湿润半干旱向干旱荒漠地区的过渡地带。众所周知,由于地理位置的过渡性、地形和地貌的复杂性、土壤的易蚀性及人类对土地的过度利用,该区生态环境不断恶化,侵蚀强烈,已成为我国水土流失与生态环境问题最严重的地区之一^[1]。植被是连接生态系统生物与非生物环境的重要纽带,是恢复和维持生态系统的物质基础,对减少水土流失、改善生态环境有重要作用^[2]。朱显谟^[3]指出,植物是防治水土流失的最有效和最根本措施。植物群落在垂直方向上由不同的植被层次组成,不同的植被层次具有不同的水土保持作用。如植被的林冠层、灌层能够截留降水,改变降雨动能,起到缓冲作用;近地面的草被对于雨滴的拦截作用可以有效减缓雨滴速度,减少雨滴动能和溅蚀量,保护地表土壤免受侵害^[2];贴地面的枯枝落叶层和结皮层直接覆盖地表,可避免雨滴直接作用于土层,减少土壤溅蚀^[4-6],也能有效拦截地表径流,减弱其剥蚀能量,减少细沟或切沟侵蚀的发生^[7]。

因此,植被要产生良好的水土保持作用,就必须具有一定的植被覆盖度,良好的结构,这是植被保持水土的关键^[8]。恢复具有合理结构与有效盖度的植被也是控制该区水土流失、改善生态环境的根本途径^[9-10]。但目前对植被水土保持作用的评估,主要以单纯的植被投影盖度表示,并未考虑植物群落的垂直结构层次,难以反映植物群落结构差异对水土流失的影响。Wen等^[11]提出了结构化植被因子指数Cs的概念及计算模型,该指数是根据植物群落的垂直结构特征及不同植被垂直层在水土保持作用方面的差异,综合考虑了植被类型、群落的垂直结构组成和各层次盖度多个要素的植被盖度指标^[11-12]。由于土壤表层结皮同样具有水土保持作用,能增加土壤入渗、土壤抗冲性,减少土壤溅蚀等^[4,13-14],但该指数模型并未提及。本研究将在原指数模型的基础上,增加结皮层的水保作用系数,进一步完善该指数模型,通过对不同植物群落各垂直结构层的盖度统计,计算群落的

结构化植被因子指数,并结合前人监测的不同群落类型土壤侵蚀量数据,探明能够抵抗土壤侵蚀的群落结构特征,为该区植被恢复和生态建设提供基础资料与依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究以陕北黄土丘陵沟壑区的延河流域($36^{\circ}23'—37^{\circ}17'N$, $108^{\circ}45'—110^{\circ}28'E$)为研究区(图1)。该流域气候属暖温带大陆性半干旱季风气候,年均温 $8.8\sim 10.2^{\circ}\text{C}$,年均降水约 $500\ \text{mm}$,其中7—9月的降雨量占全年降雨量的60%以上,径流量占全年的99%以上^[15]。流域从东南向西北,气候、温度有明显的梯度变化特征;植被随环境梯度的变化也很明显,从南向北依次为森林带、森林草原带和草原带^[16-17]。流域南部为森林带北缘,地貌类型以梁峁状黄土丘陵为主,主要建群种为辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、三角槭(*Acer buergerianum*)等,灌木有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea pubescens*)等,草本植物有披针叶薹草(*Carex lanceolata*)等,人工乔、灌木林有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana intermedia*)等^[18]。流域中部为森林草原带,是典型的梁峁状沟壑区^[19],因退耕还林草政策的实施,分布大量人工植被和自然恢复植被,乔木主要以刺槐林为主,灌丛主要是柠条、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工灌丛及封禁后形成的黄刺玫、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛,草本植物主要是铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)等^[20]。流域北部是草原带,地处毛乌素沙地南缘,是黄土高原向沙地过渡的敏感区域,植被属温带干旱草原型,主要物种有冷蒿(*Artemisia frigida*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等^[21]。

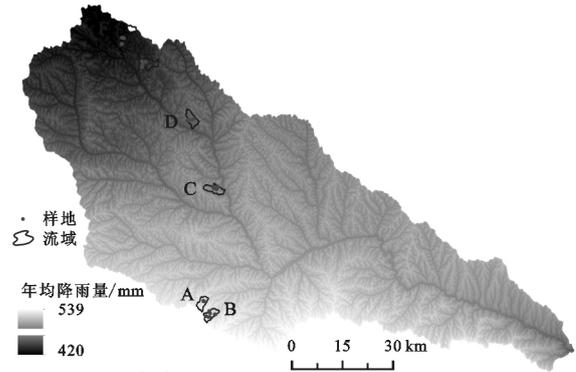
1.2 研究方法

本研究拟采用 Wen 等^[11] 依据植物群落的垂直结构特征提出的结构化植被因子指数 C_s , 并结合土壤侵蚀量的侵蚀针实测数据, 分析抵抗土壤侵蚀的群落结构特征。

其基本模型为^[12]:

$$C_s = \sum_{i=1}^i a_i C_i \quad (1)$$

式中: a_i 为不同植被层的水土保持作用系数; C_i 为各植被层的实际盖度; i 代表乔木冠层、灌木层、草被层、枯枝落叶层。考虑到土壤表层结皮对土壤侵蚀的影响, 本研究在原模型基础上, 增加了土壤表层的结皮层。



注: A 为尚合年流域; B 为毛堡则流域; C 为陈家圪流域; D 为张家河流域; E 为石子湾流域; F 为高家沟流域。

图 1 延河流域和典型小流域位置及样地分布

表 1 主要植被类型减蚀率

植被类型	研究者	相对于开垦裸地的减蚀率/%	观测时间	资料来源
草本群落	侯喜禄等 ^[22]	62.2	1980—1988 年	安塞县南沟
	王青杵等 ^[23]	50.6	2005—2009 年	阳高县
	余新晓等 ^[24]	67.3	2001—2003 年	吉县
	吴钦孝等 ^[8]	75.6		安塞、准旗
	平均	63.9		
灌木群落	申震洲等 ^[25]	97.7	2003 年	延安燕沟
	赵护兵等 ^[26]	99.4	2003 年	安塞站
	侯喜禄等 ^[22]	99.8	1980—1988 年	安塞县南沟
	陈云明等 ^[27]	99.6	1999 年	安塞站
	王青杵等 ^[23]	97.6	2005—2009 年	阳高县
	侯喜禄等 ^[28]	97.5	1987—1994 年	安塞站
	余新晓等 ^[24]	94.4	2001—2003 年	吉县
	吴钦孝等 ^[8]	99.6		安塞、河曲
	黄志霖等 ^[29]	96.0	1986—1999 年	甘肃定西
	平均	98.0		
乔木群落	徐佳等 ^[30]	96.3	2003—2008 年	延安燕沟
	赵护兵等 ^[26]	99.6	2003 年	安塞站
	侯喜禄等 ^[22]	98.9	1980—1988 年	安塞县南沟
	侯喜禄等 ^[28]	99.7	1987—1994 年	安塞站
	余新晓等 ^[24]	94.8	2001—2003 年	吉县
	于国强等 ^[31]	99.2		天水罗玉沟
	吴钦孝等 ^[8]	97.2		安塞、长武
	平均	97.9		
枯落层	郑粉莉等 ^[6]	44.6	1987—1994 年	子午岭
	侯喜禄等 ^[28]	52.0		安塞站
	吴钦孝等 ^[32]	47.1		
	平均	47.9		
结皮层	肖波等 ^[14]	26.0	2006 年	神木六道沟
	吴发启等 ^[33]	28.0	2003 年	淳化县泥河沟
	马波等 ^[13]	27.7	2010 年	室内模拟
	平均	27.2		

由于各覆盖层次在空间上分布及其控制水土流失机理的差异导致每个层次在群落控制水土流失效益中的作用有所差别。本研究通过搜集陕北黄土高

原地区大量径流小区的观测资料, 主要包括不同植被类型及枯落层、结皮层相对于开垦裸地的减蚀率(表 1), 分别确定乔木冠层、灌木层、草被层、枯枝落叶层、

结皮层的水土保持作用系数,建立结构化植被因子指数 C_s 模型。

于 2013 年、2014 年在延河流域从南到北 3 个植被带各选择 2 个典型小流域共 6 个小流域(图 1 中 A, B, C, D, E, F)为研究区域,选取了广泛分布且是自然演替各阶段的代表性植物群落以及该区主要分布的人工乔木林和灌木丛,共 12 种植物群落类型^[34]。植被调查:样方大小为乔木 10 m×10 m、灌木 5 m×5 m、草本 2 m×2 m,至少 3 人以目测法目估样方中各覆盖层的盖度,取平均值为该覆盖层盖度;采用侵蚀针法测定 12 种不同群落类型的土壤侵蚀模数。

侵蚀针法的具体测定如下:于雨季前(4 月中旬),在每个群落内从左至右设置 3 个侵蚀针监测小区(小区大小:2 m×2 m),在每个监测小区内按 50 cm×50 cm 的网格布设侵蚀测针,每个小区 9 根侵蚀测针,布设侵蚀针时采用手压或铁锤敲击方式,将铁钉沿坡面垂直方向潜入土中,以铁钉顶部与坡面平行为准,在每根侵蚀针右侧 5 cm 处插一根红色木签,以标记侵蚀针的位置,在布设时尽可能不干扰监测小区内的土壤表层状况,布设侵蚀测针的同时,采用环刀法采集土样,测定各监测小区的土壤容重;雨季结束后(10 月下旬),对每支侵蚀针上、下、左、右 4 个方向的侵蚀深或淤积深进行测量,取其平均值作为该测定点的侵蚀深或淤积深,侵蚀针出露地表代表被测定点在整个试验期间为侵蚀点;侵蚀针被覆盖代表被测定点为沉积点;侵蚀针的侵蚀深为 0 时代表被测定点在降雨过程中侵蚀与沉积平衡^[34]。

采用侵蚀针法计算监测小区的土壤侵蚀量,计算公式如下^[35]:

$$A = d \times \rho_s \times 10^3 \quad (2)$$

式中: A 为土壤侵蚀量 (t/km^2); d 为土壤侵蚀深 (mm); ρ_s 为土壤容重 (g/cm^3)。

因布设侵蚀针的样地有部分受到人为干扰与破坏,导致部分监测小区未获得监测数据,并剔除测量误差较大的小区,最终获得有效观测数据的小区共有 111 个,包括辽东栎+紫丁香 (*Syringa pekinensis*) + 大披针藎草 (*Carex lanceolata*) 群落 10 个,三角槭+紫丁香+大披针藎草群落 9 个,刺槐+铁杆蒿群落 17 个,紫丁香+虎榛子+铁杆蒿+大披针藎草群落 6 个,狼牙刺+铁杆蒿 6 个,柠条+铁杆蒿 6 个,沙棘+铁杆蒿 14 个,白羊草群落 9 个,铁杆蒿群落 9 个,长芒草群落 15 个,达乌里胡枝子群落 5 个,猪毛蒿 (*Salsola ruthenica*) + 狗尾草 (*Setaria viridis*) 群落 5 个。

2 结果与分析

2.1 群落不同覆盖层水土保持作用系数的确定

植物群落各覆盖层水土保持作用系数的确定,是建立结构化植被因子指数的关键。由于各覆盖层次在空间上分布及其控制水土流失机理的差异导致每个层次在群落控制水土流失效益中的作用有所差别。

本研究以文献资料^[6,8,13-14,22-33](表 1)中对主要植被类型数年的径流小区(以开垦裸地为对照)监测资料为依据,确定乔、灌、草等各层作用系数。根据表 1 中的数据,草本群落的平均减蚀率为 63.9%,枯落层平均减蚀率为 47.9%,结皮层平均减蚀率为 27.2%。灌木林的平均减蚀率为 98.0%,灌木林由灌木层和草本层构成,灌木层减蚀率用灌木林减蚀率减去草本层减蚀率,为 34.0%。乔木林的平均减蚀率为 97.9%,乔木林小区一般为刺槐林小区,由乔木层、草本层、枯落层组成,但林下草本一般较为稀疏,本研究以草本层盖度占 50% 计算林下草本层减蚀率,草本层减蚀率为 32.0%;林下枯落层覆盖度和厚度均较大,本研究以覆盖度 100% 计算林下枯落层减蚀率,枯落层减蚀率为 47.9%;因此,乔木层减蚀率为 18.1%。对结构完整的乔灌草群落,乔木层、灌木层、草本层、枯枝落叶层、结皮层的减蚀比例为 18.1 : 34.0 : 63.9 : 47.9 : 27.2,各层作用系数分别为 0.094 5, 0.177 9, 0.334 5, 0.250 6, 0.142 4;对缺少灌木层的乔木群落,乔木层、草本层、枯枝落叶层、结皮层的减蚀比例为 18.1 : 63.9 : 47.9 : 27.2,各层作用系数分别为 0.115 0, 0.406 9, 0.304 8, 0.173 2;对灌草群落,灌木层、草本层、枯枝落叶层、结皮层的减蚀比例为 34.0 : 63.9 : 47.9 : 27.2,各层作用系数分别为 0.196 5, 0.369 4, 0.276 8, 0.157 3;对草本群落,草本层、枯枝落叶层、结皮层的减蚀比例为 63.9 : 47.9 : 27.2,各层作用系数分别为 0.459 8, 0.344 5, 0.195 7(表 2)。

表 2 不同植被类型的结构化植被因子指数模型

植被类型	模型
乔+灌+草	$C_s = 0.0945C_1 + 0.1779C_2 + 0.3345C_3 + 0.2506C_4 + 0.1424C_5$
乔+草	$C_s = 0.1150C_1 + 0.4069C_3 + 0.3048C_4 + 0.1732C_5$
灌+草	$C_s = 0.1965C_2 + 0.3694C_3 + 0.2768C_4 + 0.1573C_5$
草	$C_s = 0.4598C_3 + 0.3445C_4 + 0.1957C_5$

注: C_1 为乔木冠层, C_2 为灌层, C_3 为草被层, C_4 为枯落层, C_5 为结皮层。

2.2 植物群落结构化植被因子指数的确定

2013 年延河流域遭遇“百年一遇”的暴雨侵袭,出现了全流域有气象记录(1945 年)以来范围最广、强度最大、持续时间长、月雨量最多的强降雨过程。

根据陕西省水利厅网站的数据,安塞站 5—10 月总降雨量达 1 071.8 mm,侵蚀性降雨量(≥ 12 mm 的降雨,下同)836.3 mm;宝塔站 5—10 月总降雨量达 1 406.8 mm,侵蚀性降雨量 1 220.4 mm。2014 年降雨量仍然远高于延河流域多年平均降雨量,根据陕西省水利厅网站的数据,安塞站 5—10 月总降雨量达 942.5 mm,侵蚀性降雨量 752.9 mm;宝塔站 5—10 月总降雨量达 1 119.6 mm,侵蚀性降雨量 894.8 mm。相比于 2013 年、2014 年总降雨量和侵蚀性降雨量均减小。

通过对 12 个不同植物群落 C_s 值的分析,并结合 2013 年和 2014 年不同群落土壤侵蚀模数数据发现,所有群落类型都呈现出随着 C_s 增大,侵蚀强度减小的趋势(图 2)。在 2013 年,自然演替早期群落及人工乔、灌群落的土壤侵蚀强度都不同程度的大于 1 000 t/(km²·a)(黄土高原地区的允许土壤流失量^[36]);自然演替中、后期群落及自然乔、灌群落随着 C_s 增大,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)。2014 年监测的不同群落土壤侵蚀强度小于 2013 年,但演替早期的猪毛蒿+狗尾草群落和人工乔、灌群落的侵蚀强度依然大于 1 000 t/(km²·a);自然演替中、后期群落及自然乔、灌群落表现出与 2013 年一致的规律,但土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)时的群落 C_s 值低于 2013 年。

在 2013 年特大暴雨年份,猪毛蒿+狗尾草群落、达乌里胡枝子群落、铁杆蒿群落、人工柠条林、人工刺槐林的减蚀能力较弱,但当以上群落的 C_s 值分别大于 23.8%,15.0%,31.7%,35.7%,30.8%,且近地面的草本层或枯落层盖度也高时(附表),土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a),为轻度侵蚀^[36]。人工沙棘林及长芒草和白羊草群落的减蚀能力强于其他草本群落,当 C_s 分别大于 34.1%,31.4%和 26.2%时,土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a);当 C_s 分别大于 41.9%,38.3%和 38.6%,且草本层和枯落层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)。自然乔、灌群落的减蚀能力最强,辽东栎+紫丁香+大披针苔草和紫丁香+虎榛子+铁杆蒿+大披针苔草群落的土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a),当 C_s 分别大于 31.0%和 48.8%,且灌木层和草本层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a);三角槭+紫丁香+大披针苔草和狼牙刺+铁杆蒿群落 C_s 分别大于 38.3%和 38.6%时,土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a),当 C_s 分别大于 36.6%和 42.2%,且灌木层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)。

在 2014 年丰水年份,猪毛蒿+狗尾草群落、人工

柠条林、人工刺槐林的减蚀能力依然较弱,但当这些群落的 C_s 值分别大于 22.1%,35.7%,26.4%,且草本层和枯落层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a),为轻度侵蚀^[36]。人工沙棘林减蚀能力强于其他人工林和早期群落,当 $C_s > 32.1%$ 时,土壤侵蚀强度小于 2 500 t/(km²·a); $C_s > 34.4%$,且草本层或枯落层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)。演替中、后期及自然乔、灌群落的减蚀能力较强,土壤侵蚀强度均小于 2 500 t/(km²·a),当达乌里胡枝子、长芒草、铁杆蒿、白羊草、狼牙刺+铁杆蒿、紫丁香+虎榛子+铁杆蒿+大披针苔草、辽东栎+紫丁香+大披针苔草、三角槭+紫丁香+大披针苔草群落 C_s 分别大于 19.2%,31.4%,34.6%,36.6%,36.1%,42.2%,21.4%,36.0%,且灌木层或草本层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 1 000 t/(km²·a)。

2.3 结构化植被因子指数与土壤侵蚀的关系

C_s 与土壤侵蚀之间有极显著的负相关关系($p < 0.000 1$),对不同群落 C_s 值与土壤侵蚀模数的关系进行拟合,发现两者之间有明显的指数关系、对数关系和二次多项式关系(表 3),其中指数函数的拟合程度最高,图 3 显示了 C_s 与土壤侵蚀强度的指数关系。

3 讨论

植物群落的结构化植被因子指数 C_s 是根据植被的不同垂直层在水土保持作用方面的差异提出的概念,更多考虑了群落结构差异对土壤侵蚀的影响^[12]。当群落结构趋于复杂时,群落的减蚀能力就愈明显。在本研究建立的 C_s 模型中,林冠层的水土保持作用系数最小,草本层和枯落层最高,其次为灌木层,这与 Wen^[11] 等和雷婉宁^[12] 建立的 C_s 模型中不同垂直层次的水土保持作用系数变化趋势一致。在黄土高原,土壤侵蚀主要在暴雨期,林冠层的防蚀贡献较小,森林的防蚀能力主要取决于林地枯枝落叶层的数量和质量^[37]。乔木层盖度再高,但要是林下结构不完整将会导致乔木群落的水土保持功能急剧下降,“远看绿油油,近看黄水流”的现象正是有些植被盖度较高而水土流失依然严重的表现,如本研究中人工刺槐林减蚀能力较弱,就算有再高的 C_s 值,土壤侵蚀强度也高于黄土高原地区的允许土壤流失量。植被的垂直分层结构对于减轻土壤侵蚀有重要作用,当植物群落的垂直层次结构越完备,其减少土壤侵蚀的作用将更加明显^[38],只有结构完整的植物群落才具有最好的水土保持作用,结构化植被因子指数正是综合考虑了群落的垂直结构组成和各层次盖度,才能准确地表达植被的水土保持作用。

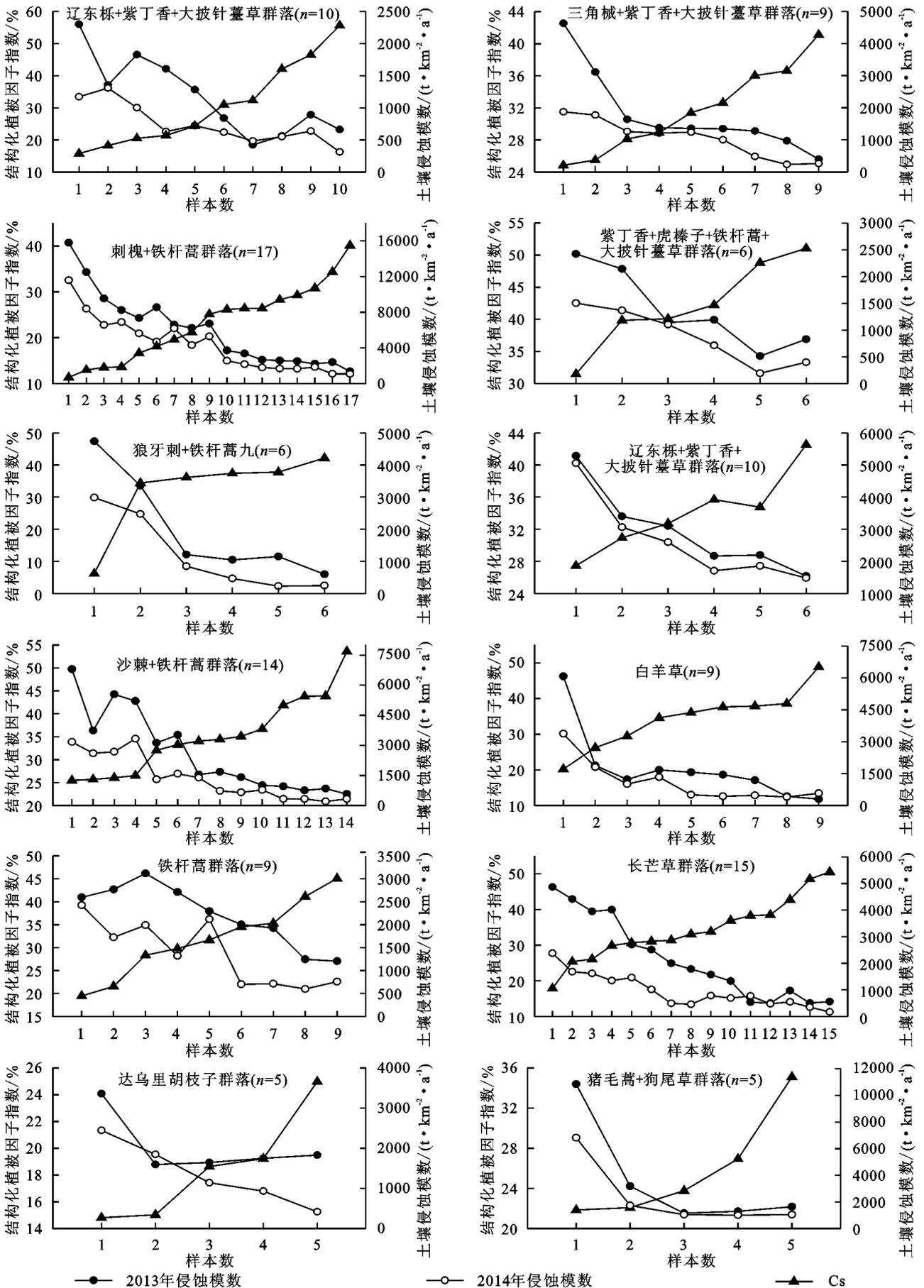
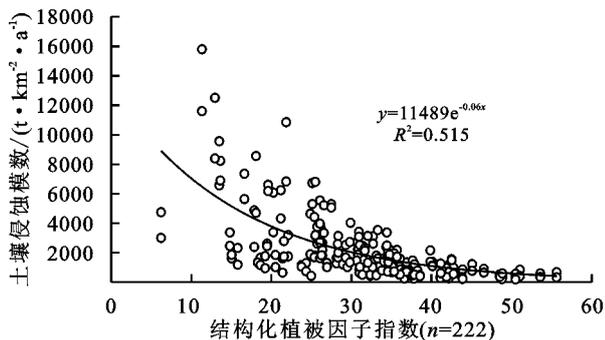


图 2 不同群落的结构化植被因子指数 Cs 与 2013 年、2014 年土壤侵蚀模数

表 3 结构化植被因子指数与土壤侵蚀模数的拟合方程

拟合曲线	方程式	R^2	p
指数函数	$y=11489e^{-0.06x}$	0.515	<0.0001
对数函数	$y=-4087\ln x+16049$	0.417	<0.0001
二次多项式	$y=3.972x^2-394.5x+10285$	0.433	<0.0001

图 3 群落的结构化植被因子指数 C_s 与侵蚀强度的关系

不同群落类型减少土壤侵蚀的能力不同,有研究发现演替中、后期草本群落的土壤抗蚀性优于人工林^[39],对于自然植被恢复而言,随植被恢复的推进,植被对地表的防护功能、土壤的持水性能和渗透性能不断加强^[40]。本研究中,演替不同阶段的草本群落,人工林,自然恢复的乔、灌群落有各自能有效减少土壤侵蚀强度的适宜 C_s 值。演替早期群落及人工林群落垂直结构简单,不能有效减少土壤侵蚀。这是由于演替早期群落物种组成简单,本身植被覆盖较低,也不能有效改善土壤结构;而人工林则是由于缺乏林下植被层,特别是贴近地面层^[41-42],因此这些群落减蚀能力较差。

演替中、后期的达乌里胡枝子和铁杆蒿群落随着 C_s 增大,能有效减少土壤侵蚀,但在暴雨年份土壤侵蚀强度高于黄土高原地区的允许土壤流失量;而演替中、后期的长芒草、白羊草群落能有效控制土壤侵蚀,随着 C_s 增大,在暴雨年份土壤侵蚀强度也小于黄土高原地区的允许土壤流失量,这与禾本科植物根系有密切联系,禾本科植物属须根系植物,须根系多分布在土壤浅层,大量细小的毛根交织形成的网对根周土体具有加筋作用,可发挥其对土壤的网络固持作用,有效提高土壤抗蚀性^[43-44]。演替中、后期的草本群落物种组成复杂,不同植物在群落中占有各自适宜的空间资源,群落具有垂直结构层,而且由于贴近地表,可以有效拦截雨滴,减少雨滴数量、滴溅数量和减蚀量;另外,经过长时间的植被恢复,土壤表层结构得到改善,对降雨的入渗和通透能力显著提高^[37,45]。自然乔、灌群落垂直结构复杂, C_s 值也较高,能有效控制土壤侵蚀,主要是因为天然林发育时间长,已经形成了比较完整且相对稳定的群落结构,群落各垂直层次可分别起到截留、蓄积滞留降水及促进入渗的作用,而且乔、灌群落根系发达,在土壤团聚体形成过程中

根系的影响极为突出,根系的作用使土壤团聚体的整体性增强,提高了土壤的抗侵蚀性^[40,46]。

拟合 C_s 与土壤侵蚀模数的关系发现,两者有明显的指数关系,同时对数函数和二次多项式的拟合也很显著,这与许多学者的研究结果一致,如植被盖度与土壤流失量之间存在明显的指数关系,随着群落盖度的增大,土壤侵蚀量呈指数下降^[47],林地侵蚀量和林地覆盖度之间存在二次多项式关系^[28]。但也有研究发现林草地覆盖度与侵蚀量之间呈倒数关系^[48],在小流域尺度上森林植被覆盖度与土壤侵蚀量之间存在幂函数关系^[49],而土壤侵蚀量与植被覆盖度之间的指数关系似乎更为多数学者认可^[50-51]。

4 结论

本研究依据文献资料的数据分析,推算出植物群落各覆盖层水土保持作用系数,建立了不同植被类型的结构化植被因子指数 C_s 模型。在建立的模型中,乔木冠层的水保作用系数最小,贴近地面的草本层和枯落层水保作用系数最大。在不同水文年中,演替早期群落及人工林均未表现出较强的减蚀能力,演替中、后期群落及自然乔、灌群落则能有效减少土壤侵蚀。

在特大暴雨年份,当长芒草、白羊草群落 $C_s > 38.3\%$,且草本层和枯落层盖度较大;自然乔、灌群落 C_s 分别大于 $31.0\% \sim 36.6\%$, $42.2\% \sim 48.8\%$,且灌木层和草本层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。在丰水年份,当演替中后期群落和自然乔、灌群落 C_s 分别大于 $19.2\% \sim 36.6\%$ 和 $36.14\% \sim 42.2\%$, $21.4\% \sim 36.0\%$,且灌木层或草本层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于 $1\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。因此,不同群落其垂直结构完整,且近地面的灌木、草本层及贴地面的枯落层中至少有一层盖度较大时,土壤侵蚀强度小于黄土高原地区的允许土壤流失量。

通过该模型计算出不同群落的 C_s 值,分析不同群落 C_s 值及土壤侵蚀强度数据发现, C_s 与土壤侵蚀强度之间存在极显著的负相关关系,对两者进行拟合,发现两者之间有明显的指数、对数和二次多项式关系。

参考文献:

- [1] Fu B J, Liu Y, Lu Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. Ecological Complexity, 2011, 8 (4): 284-293.
- [2] 焦菊英,王万中,李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 608-612.
- [3] 朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-121.

- [4] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J].自然资源学报,2012,27(8):105-112.
- [5] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].林业科学,2003,39(1):168-172.
- [6] 郑粉莉,白红英,安韶山.草被地上和地下部分拦蓄径流和减少泥沙的效益分析[J].水土保持研究,2005,12(5):86-87.
- [7] Gilley J E, Risse L M. Runoff and soil loss as affected by the application of manure[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2000,43(6):1583-1588.
- [8] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998.
- [9] Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation & Development, 2013,24(5):499-510.
- [10] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006,16(4):420-427.
- [11] Wen Z M, Brian G L, Jiao F, et al. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion[J]. Catena, 2010,83(1):87-93.
- [12] 雷婉宁.陕北黄土区结构化植被因子指数研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2009.
- [13] 马波,由政,吴发启,等.种植大豆条件下土壤结皮对坡耕地径流和侵蚀产沙的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(3):16-23.
- [14] 肖波,赵允格,邵明安.黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应[J].草地学报,2008,16(1):28-33.
- [15] 王宁.黄土丘陵沟壑区植被自然更新的种源限制因素研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.
- [16] 温仲明,焦峰,焦菊英.黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J].应用生态学报,2008,19(9):1897-1904.
- [17] 周晓红,赵景波.黄土高原气候变化与植被恢复[J].干旱区研究,2005,22(1):116-119.
- [18] 侯庆春,韩蕊莲,李宏平.关于黄土丘陵典型地区植被建设中有问题的研究[J].水土保持研究,2000,7(2):102-110.
- [19] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J].生态学报,2002,22(8):1173-1178.
- [20] Fu B J, Zhang Q J, Chen L D, et al. Temporal change in land use and its relationship to slope degree and soil type in a small catchment on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2006,65(1):41-48.
- [21] 周淑琴,吴发启,荆耀栋,毛乌素沙地南缘植被覆盖度动态监测:以陕西省靖边县为例[J].安徽农业科学,2007,35(27):8550-8551.
- [22] 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,1990,2(4):33-40.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [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] 陈云明,侯喜禄,刘文兆.黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究[J].水土保持学报,2000,14(3):57-61.
- [28] 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.
- [29] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶,等.黄土丘陵沟壑区不同退耕类型径流、侵蚀效应及其时间变化特征[J].水土保持学报,2004,18(4):37-41.
- [30] 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,2012,32(11):1391-1396.
- [31] 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.
- [32] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].水土保持学报,1998,4(2):23-28.
- [33] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2005,3(2):97-101.
- [34] 王志杰.延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [35] 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.
- [36] 中华人民共和国行业水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007[M].北京:中华人民共和国水利部,2008.
- [37] 王晗生,刘国彬.试论防蚀有效植被的基本特征:贴地面覆盖[J].中国水土保持,2000(3):28-31.
- [38] Casermeiro M A, Molina J A, Caravaca M T D L C, et al. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate [J]. Catena, 2004,57(1):91-107.

(下转第 21 页)

- ponding depth on infiltration in a crusted surface depression[J]. *Catena*, 1998,32:87-100.
- [10] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [11] 罗键,郑子成,李廷轩,等. 横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(4):66-72.
- [12] 王鹏飞,郑子成,张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(2):30-34.
- [13] 秦凤,郑子成,李廷轩,等. 玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2013,27(3):18-22.
- [14] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 降雨过程对地表糙度的影响[J]. *水土保持学报*, 2009,23(5):30-33.
- [15] 张利超,杨伟,李朝霞,等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. *农业工程学报*, 2014,30(22):155-162.
- [16] Luk S H, Abrahams A D, Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiments[J]. *Phys. Geogr.*, 1986,7(4):344-356.
- [17] Darboux F, Davy, Gascuel-Oudou C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments[J]. *Caneta*, 2001,46(3):125-139.
- [18] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005,69:748-756.
- [19] 赵军,雷廷武,张晴雯,等. 激光微地貌扫描仪的开发研制及在坡面侵蚀研究应用初步[J]. *山东农业大学学报*, 2001,32(2):201-206.
- [20] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [21] Helming K, Roth C H, Wolf R, et al. Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs)[J]. *Soil Technology*, 1993,6:273-286.
- [22] Helming K, Römkens M J M, Prasad S N, et al. Erosional development of small scale drainage networks [J]. *Process Modelling and Landform Evolution*, 1999,78:123-145.
- [23] Römkens M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2001,46:103-123.
- [24] Rudolph A, Helming K, Diestel H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes[J]. *Soil Technology*, 1997,10:69-81.
- [25] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988,54(11):1593-1600.

~~~~~

(上接第14页)

- [39] 韩鲁艳,郝乾坤,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区人工林地的土壤抗蚀性评价[J]. *水土保持通报*, 2009,29(3):159-164.
- [40] Cerd A. Soil erosion after land abandonment in a semi-arid environment of southeastern Spain[J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 2009,11(2):163-176.
- [41] Kou M, Jiao J Y, Yin Q L, et al. Successional trajectory over 10-years of vegetation restoration of abandoned slope croplands in the Hill-Gully Region of the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2016,27(4):919-932.
- [42] 赵护兵,刘国彬,曹清玉. 黄土丘陵区不同植被类型对水土流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2004,11(2):153-155.
- [43] 寇萌,焦菊英,王巧利,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J]. *农业机械学报*, 2016,47(2):161-171.
- [44] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003,17(3):34-37.
- [45] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005,20(1):74-80.
- [46] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003,28(4):371-384.
- [47] 王秋生. 植被控制土壤侵蚀的数学模型及其应用[J]. *水土保持学报*, 1991,5(4):68-72.
- [48] 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.
- [49] 余新晓,毕华兴,朱金兆,等. 黄土地区森林植被水土保持作用研究[J]. *植物生态学报*, 1997,21(5):433-440.
- [50] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地盖度季动态及其水保效益[J]. *水土保持通报*, 1995,15(2):38-43.
- [51] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002,13(8):1033-1036.