

黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响

陈卓鑫¹, 王文龙^{1,2}, 郭明明¹, 王天超¹, 郭文召¹,
王文鑫¹, 康宏亮¹, 杨波³, 赵满¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 郑州 450003)

摘要: 通过采集不同地貌部位(塬面、塬坡和沟坡)各土地利用(农地、草地、灌木地和林地)坡面土壤和根系样品, 采用综合土壤可蚀性指数(CSEI)评价了植被恢复对土壤可蚀性的影响。结果表明: (1)不同地貌部位的CSEI差异显著, 沟坡CSEI较塬坡和塬面分别增加8.1%和77.7%。(2)塬面草地、灌木地和林地的CSEI较农地分别降低21.1%、29.2%和28.8%; 而塬坡和沟坡林地CSEI均低于其他土地利用。(3)CSEI与粘粒含量、砂粒含量、毛管孔隙度、根重密度、根平均直径、根长密度及根表面积密度均呈极显著负相关, 而与粉粒含量和土壤容重呈显著正相关关系; 粉粒含量、土壤容重和根重密度是影响CSEI的关键因素, 其中粉粒含量对CSEI的直接影响最大, 而根重密度通过直接或间接作用对CSEI产生负相关影响。建议在塬面上以灌木作为植被恢复模式的首选, 而在塬坡和沟坡上选择以乔木为优势群落的恢复模式对水土流失的控制更为有效。

关键词: 土壤可蚀性; 地貌部位; 土地利用; 植被恢复; 土壤特性; 根系特征; 黄土高原

土壤侵蚀制约着粮食生产、环境质量及土地生产可持续发展, 已成为全球性的重大环境问题^[1]。黄土高原作为世界上土壤侵蚀最严重的地区之一, 年平均土壤侵蚀率高达 $5000\sim 10000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[2], 严重的水土流失与黄土高原特殊的地貌、气候、土壤的易蚀性和强烈的人类活动息息相关^[3]。而黄土高原沟壑区作为黄土高原的生态环境脆弱区和水土流失重灾区, 沟壑区内塬面、塬坡、沟坡地貌构造分布明显, 沟头向塬面的溯源侵蚀、沟道的下切作用和坡面的侧向发育使沟壑区地表破碎、沟壑纵横、水土流失严重^[4]。为此, 政府开展了一系列治理沟壑区侵蚀的植被措施、工程措施和农业措施等^[5]。这引起了土地利用的显著变化, 因此植被特征也发生了巨大变化, 且植被恢复逐渐成为控制水土流失的关键措施, 这归因于植被对土壤性质的改善和土壤可蚀性的减小^[4]。土壤可蚀性是指土壤对侵蚀过程的敏感性, 常用于植被恢复对土壤质量的效益评估^[6]。

在黄土高原沟壑区, 塬面、塬坡和沟坡地貌特征明显不同, 塬面较为平坦地势相对较高, 塬坡和沟坡坡度相对较大且二者被一条清晰的沟沿线隔开, 且位于沟沿线下方的沟坡坡度更为陡峭(图1)。研究表明, 地貌形态显著影响土壤水分的分布^[7], 且土壤水分的变化随着地形异质性的增加而增加^[8]; 另外, 坡位也影响着水分利用^[9], 与上端相对

收稿日期: 2019-04-02; 修订日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571275)

作者简介: 陈卓鑫(1994-), 男, 湖南邵阳人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xiyu.zxchen@foxmail.com

通讯作者: 王文龙(1964-), 男, 陕西大荔人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。

E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

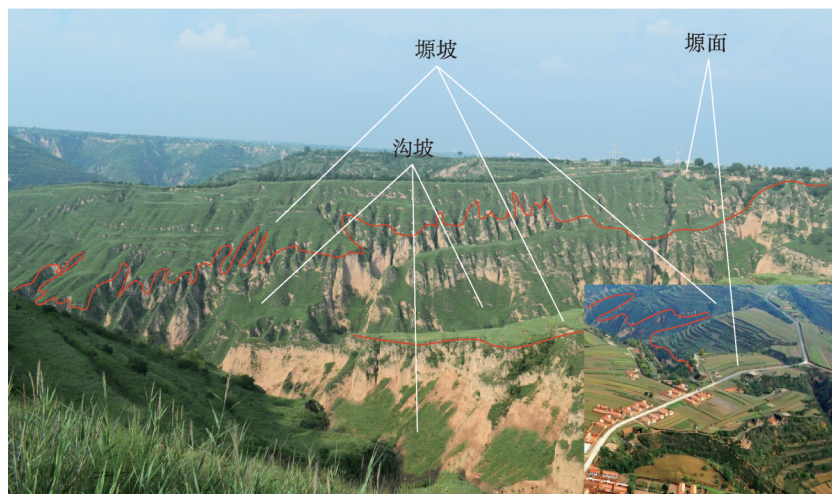


图1 黄土高原沟壑区不同地貌分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of different geomorphological locations in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau

平缓的坡面相比,陡峭起伏的沟壑斜坡可能产生恶劣的水分利用环境^[10],土壤水分分布的差异也将影响土壤性质和植被恢复状况。因此,地貌特征的差异势必影响土壤可蚀性^[11]。目前的研究多针对单一地貌类型坡面植被恢复对土壤可蚀性的影响,缺乏对不同地貌部位的土壤可蚀性系统性评价,尤其关于对黄土高原沟壑区不同地貌部位土壤可蚀性的评价还较为鲜见,仍需进一步明确。

另外,在不同地貌部位上土地利用结构也有较大的区别,而植被恢复后土地利用的变化也会改变土壤性质和植被条件,从而影响土壤可蚀性。研究表明,植树造林是提高土壤稳定性和降低土壤可蚀性的有效手段^[12];农地向草地或林地的转变使土壤有机质含量增大、土壤团聚体稳定性更为稳定,降低了土壤可蚀性^[13]。对于不同的土地利用而言,Zhang等^[3]研究发现灌木和草地群落与农地相比都有效地降低了土壤可蚀性,但对草地群落的影响更明显,而Chen等^[14]得出了相反的结论,这说明不同土地利用对土壤可蚀性的影响因研究区域而异。一般来说,植被恢复对土壤可蚀性的影响由土壤性质和根系特征控制。Knapen等^[15]发现土壤的抗蚀能力与土壤容重呈负相关;Zhang等^[16]研究表明在空间分布上土壤可蚀性随粘粒含量的增大而减小;Li等^[17]研究表明土壤可蚀性与粉粒含量呈正相关;此外,一些研究也表明了土壤可蚀性随土壤有机质、水稳性团聚体和饱和导水率的增大而减小^[3,18]。植被根系可通过物理结合作用和化学吸附作用来增强土壤稳定性^[19]。在高原沟壑区,不同地貌部位的植被生长环境存在差异,植被恢复的差异影响土壤可蚀性。开展地貌部位和植被恢复引起的土壤可蚀性变化的研究对于合理规划沟壑区植被措施至关重要。但目前很少有研究关注不同地貌部位的植被恢复引起的土壤可蚀性变化。

鉴于此,本研究通过对黄土高原沟壑区三个典型的地貌部位(塬面、塬坡和沟坡)各土地利用坡面(农地、草地、灌木地和林地)进行土壤和根系取样,通过加权和法计算各样地土壤可蚀性指数。从而明确由不同地貌部位引起的土壤可蚀性差异,阐明植被恢复模式对土壤可蚀性的影响,并探讨土壤可蚀性与影响因子之间的关系。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原沟壑区总面积约为3.56万km², 其中, 董志塬保存最完好、面积最大, 有“天下黄土第一塬”和“陇东粮仓”的美誉, 是黄土高原沟壑区的典型代表区。本研究区位于董志塬内的南小河沟流域(35°41′~35°44′N, 107°30′~107°37′E), 该流域在1952年被黄委会西峰水保站选为黄土高原沟壑区的典型小流域^[20], 流域总面积约为36.3 km², 海拔高度1064~1432 m, 塬面与沟底相对高差达150~200 m。该地区属于半干旱大陆性气候, 年平均气温10° C, 年降雨量约为523 mm。主要土壤类型为黄绵土, 粉质壤土, 土质疏松, 在暴雨作用下易发生水土流失。南小河沟地貌分布类型具有典型的黄土高原沟壑区特征, 流域内塬面、塬坡和沟坡具有明显的分界特征(图1), 其中塬面面积占57%, 坡度多小于5°; 塬坡面积占16%, 坡度主要集中在10~25°, 多以草地、林地为主; 而沟坡坡度较大, 多为40°以上甚至处于垂直状态的悬崖立壁^[21]。

为了固沟保塬和充分利用水土资源, 南小河沟流域自20世纪50年代起大规模开展了“塬、坡、沟三道防线”和退耕还林还草工程等水土流失治理模式, 有效地遏制了水土流失, 使其成为生态环境治理的科技示范性流域。治理后植被条件得以改善, 流域内乔、灌、草物种较为丰富。目前, 该流域内主要代表植被类型包括刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、山杏 [*Armeniaca sibirica* (Linn.) Lam.]、山杨 (*Populus davidiana* Dode)、榆树 (*Ulmus pumila* Linn.) 等乔木, 酸枣 [*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow.]、胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 等灌木植被和白羊草 [*Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng]、铁杆蒿 (*Artemisia vestita* Wall. ex Bess.)、长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.)、冰草 [*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.] 等草本类植物, 同时这也是黄土高原沟壑区常见的植被类型。

1.2 样点选择

基于对南小河沟土地利用类型和植被恢复状况的野外调查, 确定了流域内土地利用类型的优势种群落。本研究在南小河沟流域共选取了28个采样点, 这些选点都具有相同土壤类型。其中在塬面、塬坡和沟坡上各有11个、10个和7个采样点, 以反映不同地貌特征对土壤可蚀性的影响。针对于不同的土地利用, 在塬面上选取了1个农地为对照点、5个草地取样点、2个灌木地取样点和3个乔木地取样点; 在塬坡上同样选取了1个农地为对照点、5个草地取样点、1个灌木地取样点和3个乔木地取样点; 在沟坡上选取了3个草地取样点、1个灌木地取样点和3个乔木地取样点, 由于“三道防线”治理模式的实施, 沟坡上几乎很难发现有坡耕地, 以致沟坡位置并未有农地采样点。需要说明的是, 在各地貌部位所选的样点都是在该地貌部位最典型的植被群落。为了最大限度的减少选点对实验结果的潜在影响, 在同一地貌部位的选点都具有相似的海拔高度、坡度和坡向。所选取样点的基本信息如表1所示。

1.3 样品的收集与测定

试验采样在2018年6月到2018年9月进行。在每个优势群落取样点内均随机设置3个样地, 植被调查样方尺寸视植被类型而定(农地为1 m×1 m、草地为1 m×1 m、灌木地为5 m×5 m和乔木林地10 m×10 m), 用来获取土壤性质数据(土壤粒径分布、有机质含量、容重、毛管孔隙度、饱和导水率和水稳性团聚体平均重量直径)和植被根系数

表1 取样点土地利用、地形和植被的基本信息

Table 1 Basic information of land use, topography and vegetation at sampling sites

地貌部位	土地利用	优势种	坡度/(°)	坡向	植被覆盖度	高程/m		
塬面	农地	玉米	2	半阴坡	—	1350		
		草地	长芒草	9	半阴坡	75	1297	
	灌木地		白蒿	6	半阳坡	75	1287	
			苜蓿	2	阴坡	86	1272	
			猪毛蒿	3	阳坡	64	1257	
			白羊草	8	半阴坡	76	1251	
			胡枝子	3	半阳坡	90	1358	
			沙棘	5	阳坡	86	1314	
		林地		山杏	3	阳坡	69	1305
				刺槐	3	阳坡	75	1305
				核桃	2	半阳坡	86	1278
		塬坡	农地	小麦	20	阳坡	—	1316
				草地	猪毛蒿	25	阳坡	62
灌木地			冰草	30	阳坡	72	1242	
			白蒿	29	半阳坡	81	1245	
			铁杆蒿	26	阳坡	83	1252	
			白羊草	25	半阳坡	92	1254	
			酸枣	25	半阴坡	74	1243	
	林地			刺槐	31	阳坡	54	1238
				侧柏	29	阳坡	44	1225
				山杏	26	半阴坡	53	1240
	沟坡		草地	铁杆蒿	65	半阳坡	60	1270
				长芒草	47	半阳坡	46	1170
				白羊草	46	半阳坡	62	1172
灌木地		胡枝子	36	半阴坡	82	1168		
林地			刺槐	45	半阳坡	48	1182	
			山杏	48	半阴坡	82	1150	
			山杨	38	半阳坡	56	1155	

注：“—”表示采样过程中农地的农作物已收获以致覆盖度未测量；表中植物拉丁文如下：玉米 (*Zea mays* L.)、白蒿 (*Herba Artemisiae Sieversianae*)、苜蓿 (*Medicago Sativa Linn*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor Turcz.*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides Linn.*)、核桃 (*Juglans regia L.*)、小麦 (*Triticum aestivum L.*)。

据 (根重密度、根长密度、根表面积密度和根平均直径)。

在采样之前,先小心去除样地上的地上生物,然后在每个样地内以S型取表层(0~20 cm)未受干扰的45个(3个样地×5个土壤样品×3次重复)土壤样品。用100 cm³(直径5 cm,高5 cm)的钢制换刀进行土壤取样,并现场称取其重量。将收集的一个土柱用5 mm深的水层浸透6 h后并称重,随后放入烘箱内干燥24 h再次称重以测量毛细管孔隙率和土壤容重^[22]。将另外一个土柱浸透至饱和后通过常水头法测定饱和导水率^[23]。在每个样方内取3份(使用塑封袋)大约为1 kg的复合土样,风干后用于测定土壤机械组成、有机质含量和水稳性团聚体含量。土壤粒径分布使用MasterSizer 2000激光测量仪

测量土壤颗粒分布。重铬酸钾法外加热测定有机质含量。水稳性团聚体采用湿筛法, 平均重量直径用于评价水稳性团聚体稳定性的指标, 由每个孔筛上留下的土壤干重计算^[4]。

在每个样方内, 使用自制的 20 cm×20 cm×10 cm (长×宽×深) 钢制盒子取得 3 个根系样品, 共 252 个根系样品。将土样浸泡在带有筛网 (孔径 2 mm) 的过滤桶中浸泡 24 h, 用来分散根系和土壤, 然后用低压水流进行多次洗涤, 用镊子挑选出所有的活根。分别用 Epson V 700 扫描仪和 Win RHIZO 图像分析软件进行扫描和分析, 以获得根长密度、根表面积密度和根平均直径。将扫描分析后的根放入 65 °C 下的烘箱干燥 24 小时并称重以计算根重密度。

土壤可蚀性因子采用 Williams 等^[24]提出的土壤侵蚀与土地生产力模型 (EPIC) 计算方法进行计算, 该方法基于粒径分布和有机碳含量进行估算, 其计算如式 (1):

$$K_{epic} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256Sand(1 - Silt)/100]\} \times \left(\frac{Silt}{Clay + Silt}\right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times \left[1.0 - \frac{0.7N_1}{SN_1 + \exp(-5.51 + 22.95SN_1)}\right] \quad (1)$$

式中: *Sand* 为砂粒含量; *Silt* 为粉粒含量; *Clay* 为黏粒含量; *C* 为有机碳含量 (%), $C = 0.583 \times OMC$; $SN_1 = (1 - Sand)/100$; K_{epic} 为土壤可蚀性因子, 为美国制单位, 乘 0.1317 转化为国际制单位 $t \cdot hm^2 \cdot h/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$ 。

为全面评价土壤可蚀性, 本研究采用加权求和法得出了综合土壤可蚀性指数^[25] (Comprehensive Soil Erodibility Index, CSEI):

$$CSEI = \sum_i^n E_i \times C_i \quad (2)$$

式中: *CSEI* 为综合土壤可蚀性指数, 数值范围在 0~1 之间; E_i 为第 i 个评价指标的隶属度值; i 为土壤可蚀性指标个数; C_i 为第 i 个评价指标的权重, 反映该指标对土壤可蚀性的贡献; n 为评价指标的个数。

采用主成分分析法 (PCA) 计算 *CSEI* 分为以下三个步骤: (1) 参数的选取, 本研究选择土壤可蚀性因子 (K_{epic})、水稳性团聚体平均重量直径 (*MWD*)、饱和导水率 (*SHC*) 和有机质含量 (*OMC*) 作为评价土壤可蚀性强度的指标进行综合分析; (2) 在主成分分析中, 公因子方差反映某一指标对整体方差的贡献程度, 公因子方差越大则代表贡献程度越高。本研究基于每个指标的公因子方差所占的百分比来作为土壤可蚀性指标的权重 (C_i 值) (表 2); (3) 基于临界值将指标值转换为隶属度值 (0~1), 本研究取每个土壤可蚀性指标的最大值 (b) 或最小值 (a); (4) 各指标按图 2 所示公式进行计算隶属度值 (K_i), 在 S 曲线评分函数中, 土壤可蚀性指标在一定范围内与土壤可蚀性呈正相关, K_{epic} 由 S 函数描述, 而对于反 S 函数, 土壤可蚀性指标在一定范围内与土壤可蚀性呈负相关, *MWD*、*SHC* 和 *OMC* 由反 S 函数计算。根据 *CSEI* 的大小, 将综合土壤可蚀性指数等距划分为五个等级^[26], 用来表达土壤容易被侵蚀的程度, 划分等级和标准如表 3 所示。

1.4 数据分析

数据统计使用 Microsoft Excel 2013 和 R 语言进行, 使用 R 语言 (版本 R-3.5.1) 进行主成分分析、方差分析、Pearson 相关性分析、多元线性回归分析和路径分析, 使用 R 语言和 Origin 2019 进行图形制作。

2 结果分析

2.1 地貌部位对综合土壤可蚀性指数的影响

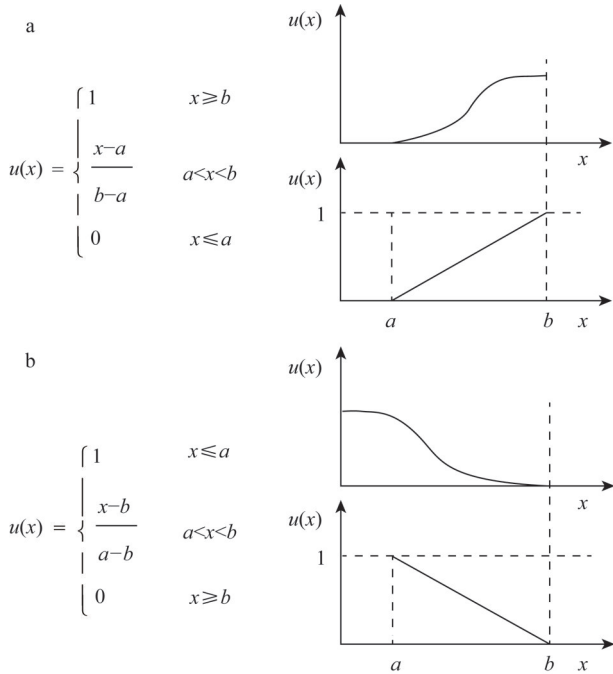
如图3所示,不同地貌部位的综合土壤可蚀性指数(CSEI)差异显著。三个不同地貌部位的平均CSEI在0.451~0.801之间变化,塬面的CSEI显著低于塬坡和沟坡($P < 0.05$),但塬坡与沟坡之间没有显著性差异($P > 0.05$)。根据土壤可蚀性程度评价等级划分(表3),塬面土壤可蚀性等级属于“中等”。在塬面上,坡度相对较缓(表1),植被赖以生存的生长环境相对较好,降低了土壤可蚀性^[27];而对于塬坡而言,塬坡的CSEI是塬面CSEI的1.64倍,塬坡土壤可蚀性等级属于“较易”,这主要是因为坡度的增加引起了土壤水分的空间变异性^[28],Zheng等^[29]发现离沟沿线距离越远,土壤含水量越大,也就是说在塬坡上比在塬面上水分的损耗更大,再加之由塬面汇集的径流易携带走塬坡土壤表层的有效养分,导致塬坡可蚀性增大;相比于塬坡和塬面,沟坡的CSEI最大,分别高出了8.1%和77.7%,与谢云等^[30]的研究结果相似,此时,沟坡土壤可蚀性等级达到“易”级别。在高塬沟壑区,沟坡更为陡峭起伏的地形增加了地形的异质性^[31],降雨时易产生地表径流,水分很快的排干,沟坡侧壁往往水分更少^[32],影响土壤储水量和植被对水分的利用^[33]。一般来说,塬坡水分含量大于沟坡水分含量^[34],而在半干旱的地区中,土壤水分是控制植被恢复的关键因素^[9,35],植被恢复和土壤水分的差异性使不同的地貌部位的抗蚀能力产生差异^[3]。因此,植被恢复应在沟坡上多下工夫。

2.2 土地利用对综合土壤可蚀性指数的影响

图4表明不同地貌部位下不同的土地利用CSEI差异显著。在塬面上,农地的CSEI最大,草地、灌木地和林地CSEI较农地分别降低21.1%、29.2%和28.8%,灌木地土壤可蚀性最小,但四种土地利用的CSEI没有显著性差异($P > 0.05$),各土地利用土壤可蚀性等级属于“中等”。Wang等^[36]在丘陵沟壑区研究发现,灌木地的土壤可蚀性最低并显著低于其他土地利用类型,草地、灌木地和林地土壤可蚀性与农地相比分别下降53.0%、

表2 综合土壤可蚀性指数(CSEI)指标体系及权重分布
Table 2 Index system and weight distribution of comprehensive soil erodibility index (CSEI)

指标	<i>K</i>	<i>SHC</i>	<i>WMD</i>	<i>OMC</i>
公因子方差	0.87	0.54	0.82	0.91
因子权重	0.28	0.17	0.26	0.29



注: $u(x)$ 为隶属函数,分别为S曲线(A)和反S曲线分布(B); x 为土壤可蚀性指标的实测值,小写字母 a 和 b 为土壤可蚀性指标临界值的下界和上界。

图2 隶属函数与土壤可蚀性指标的关系

Fig. 2 Relationship between membership function and soil erodibility index

表3 土壤可蚀性程度评价等级划分

Table 3 Grade division for soil erodibility evaluation

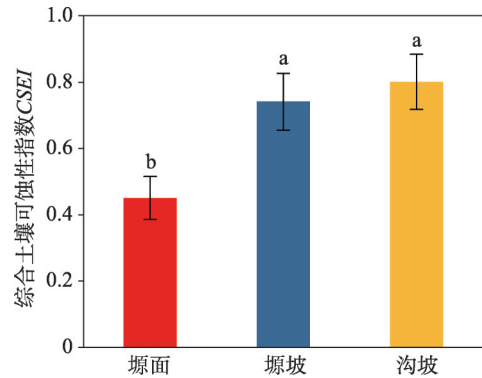
评价等级	难	较难	中等	较易	易
综合土壤可蚀性指数	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1

77.2%和59.6%，植被恢复对土壤可蚀性降低程度高于本研究结果，这可能与土壤类型有关^[17]。

在塬坡上，不同土地利用下的CSEI由大到小依次为农地、草地、灌木地和林地，农地的CSEI分别高出16.3%、20.6%和44.1%，农地土壤可蚀性等级达到“易”。农地土壤可蚀性最大的原因与农业活动直接有关，种植、耕作、除草和收获破坏了土壤表层的自然土体结构^[37]，从而降低了土壤的抗蚀性^[2]。随着植被恢复的进行，林地的CSEI显著低于农地、草地和灌木地，而草地与灌木地的CSEI没有显著性差异($P>0.05$)，这也说明了草地和灌木地比林地在地貌上更容易遭受侵蚀^[37]。

在沟坡上，林地的CSEI显著低于草地和灌木地的CSEI，而草地和灌木地之间的CSEI没有显著性差异。Zhang等^[3]研究发现，与农地相比，沟坡不同植物群落均都能显著降低土壤可蚀性，但是草地群落的影响更明显。而本研究表明以乔木为优势群落的林地对土壤可蚀性的影响更大，这说明以乔木为优势群落在恶劣的沟坡环境下具有较高的水分利用率和较强的养分吸收能力。

整体上，各地貌部位植被恢复都有效地降低了土壤的可蚀性，植被恢复仍然是控制黄土高原地区水土流失的关键措施^[3,22]。为了更合理地利用和保护黄土高原的水土资源，建议对农地进行保护性耕作措施等来减少农地的水土流失^[38]。在不同的地貌部位上，应合理布设植被配置来进行植被恢复，然而何种植被配置最佳却存在争议，不同的研究者得出的结论各不相同^[22,39,40]。这充分说明地貌部位对于植被恢复的重要性，现阶段应该立足



注：不同的字母代表不同地貌部位对CSEI有显著影响($P<0.05$)，下同。

图3 不同地貌部位综合土壤可蚀性指数

Fig. 3 Variation in comprehensive soil erodibility index with geomorphological location

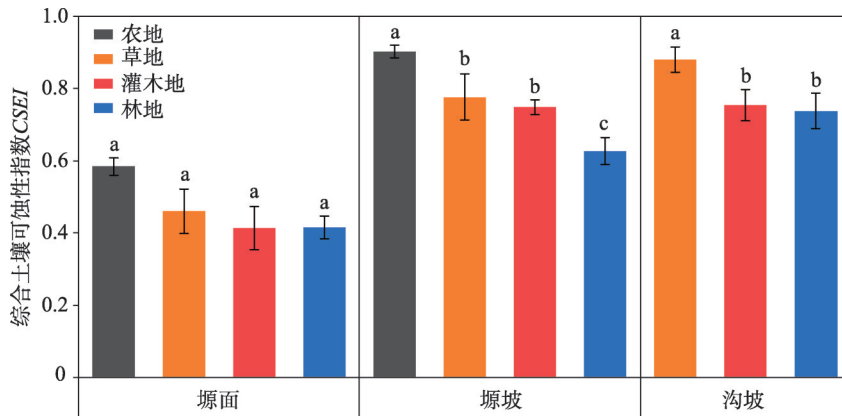


图4 不同地貌部位条件下土地利用对综合土壤可蚀性指数的影响

Fig. 4 Effect of land use on comprehensive soil erodibility index on different geomorphological locations

于更精细化的植被配置，因地制宜。需要根据不同地貌部位的地形特征、土壤条件以及气候等因素进行科学合理的植被恢复空间规划，否则盲目地进行植被恢复可能会导致适得其反的效果。本研究建议在塬面上选择以灌木作为植被恢复的首选植被；在塬坡和沟坡上选择乔木为优势群落的恢复模式对于水土流失的控制更为有效。

2.3 综合土壤可蚀性指数与影响因素之间的关系

土壤可蚀性是影响土壤侵蚀的一个重要因素^[41]。Pearson相关性分析表明 *CSEI* 与粘粒含量 (*Clay*)、砂粒含量 (*Sand*)、毛管孔隙度 (*SCP*)、根重密度 (*RBD*)、根平均直径 (*RAD*)、根长密度 (*RLD*) 和根表面积密度 (*RSA*) 呈显著负相关 ($P<0.01$)，与粉粒含量 (*Silt*)、土壤容重 (*SBD*) 呈显著正相关 (图 5)。逐步回归 *CSEI* 与这 9 个土壤和根系特征参数的结果表明，*CSEI* 与 *Silt*、*SBD* 和 *RBD* 多元线性回归结果极显著 (图 6a, $P<0.01$)。如图 6a 所示，图中散点分布趋势表明，当 *CSEI* 实测值小于 0.5 时，预测值偏离 1:1 线并高估了实测值，而大于 0.5 时，关系点基本都贴近于 1:1 线。通过路径分析来确定 *Silt*、*SBD* 和 *RBD* 对 *CSEI* 的直接和间接影响 (图 6b)。路径系数的大小表明对 *CSEI* 的影响程度，其中 *Silt* 的直接影响最大 (0.65)，其次为 *RBD* (-0.25)，而 *SBD* 最低 (0.05)。由于 *Silt* 和 *RBD* 的变化会引起 *SBD* 的变化，从而间接的影响 *CSEI*，其中 *RBD* (-0.34) 的间接效应最高，其次为 *Silt* (0.01)，*RBD* 的间接效应大于直接效应，这也说明 *RBD* 对 *CSEI* 的重要性，且 *RBD* 与 *Silt* 之间也有着强烈的相互作用。以上结果也表明土壤性质和根系特征共同引起 *CSEI* 的变化。引起土壤可蚀性变化的主要原因与根系的两个方面作用有关^[42]：(1) 根系的物理结合作用，植物根系通过在土壤中形成根系网络来固结土体；(2) 根系

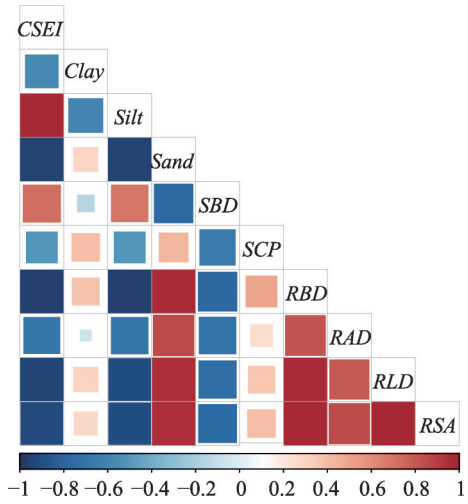


图 5 综合土壤可蚀性指数与影响因素的相关性

Fig. 5 Correlations between comprehensive soil erodibility index and influencing factors

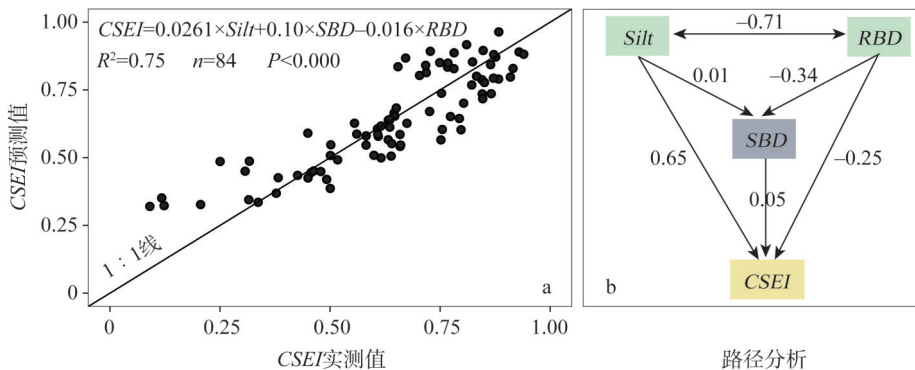


图 6 综合土壤可蚀性指数观测值和预测值关系与综合土壤可蚀性指数和影响因素的路径图

Fig. 6 Relationship between observed and predicted values of comprehensive soil erodibility index and the path diagram of comprehensive soil erodibility index and influencing factors

分泌物的化学分泌结合效应,根系产生的分泌物改善了土壤有机质含量,并促进为团聚体的形成、孔隙度的增加及土壤渗透性能的提升,根系分泌物也可通过对根际土粒粘合作用形成根—土复合体来提高土体稳定性。在植被恢复过程中,土壤—根系之间的共同作用可能在土地利用转变后土壤可蚀性的变化发挥着重要作用^[4]。

3 结论

通过对黄土高原沟壑区塬面、塬坡和沟坡上的农地、草地、灌木地和林地原状土采样,采用加权和法求得综合土壤可蚀性指数(CSEI),旨在阐明不同地貌部位和土地利用对CSEI的影响,以及CSEI与影响因素之间的关系。得出以下结论:

(1) 不同地貌部位的CSEI具有显著差异,CSEI在0.451~0.801之间变化。塬面的CSEI显著低于塬坡和沟坡,土壤可蚀性等级属于“中等”;塬坡的CSEI是塬面CSEI的1.64倍,土壤可蚀性等级属于“较易”;而沟坡的CSEI相比于塬坡和塬面分别高出了8.1%和77.7%,土壤可蚀性等级达到“易”,在植被恢复过程中应更着重于沟坡位置。

(2) 塬面草地、灌木地和林地的CSEI相比于农地降低了21.1%、29.2%和28.8%;在塬坡和沟坡上,林地的CSEI低于其他土地利用,整体上,各地貌部位植被恢复均有效的降低了土壤的可蚀性。本研究建议在塬面上选择以灌木作为植被恢复的首选植被,在塬坡和沟坡上选择乔木为优势群落的恢复模式可能对于水土流失的控制更为有效。

(3) 土壤性质和植被根系条件的差异是导致土壤可蚀性变化的主要原因。CSEI与粘粒含量(*Clay*)、砂粒含量(*Sand*)、毛管孔隙度(*SCP*)、根重密度(*RBD*)、根平均直径(*RAD*)、根长密度(*RLD*)和根表面积密度(*RSA*)呈显著负相关($P < 0.01$),而与粉粒含量(*Silt*)、土壤容重(*SBD*)呈显著正相关;逐步回归表明,CSEI与*Silt*、*RBD*和*SBD*呈极显著的多元线性关系($P < 0.01$),其中*Silt*对CSEI的直接影响最大,而*RBD*通过直接或间接作用对CSEI产生负面影响。

参考文献(References):

- [1] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用Le Bissonnais法研究黄土丘陵区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响.自然资源学报,2016,31(2):287-298.[LI Y Y, LIU L, AN S S, et al. Research on the effect of vegetation and slope aspect on the stability and erodibility of soil aggregate in loess hilly region based on Le Bissonnais method. Journal of Natural Resources, 2016, 31(2): 287-298.]
- [2] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38: 1725-1734.
- [3] ZHANG B J, ZHANG G H, YANG H Y, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. Catena, 2019, 173: 375-383.
- [4] GUO M M, WANG W L, LIANG K H, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China. Journal of Arid Land, 2018, 10(5): 712-725.
- [5] ZHANG X P, ZHANG L, ZHAO J, et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. Water Resources Research, 2008, 44(7): 2183-2188.
- [6] 魏慧,赵文武,王晶.土壤可蚀性研究述评.应用生态学报,2017,28(8):2749-2759.[WEI H, ZHAO W W, WANG J. Research progress on soil erodibility. Chinese Journal of Applied Ecology. 2017, 28(8): 2749-2759.]
- [7] HAWLEY M E, JACKSON T J, MCCUEN R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. Jour-

- nal of Hydrology, 1983, 62: 179-200.
- [8] CHARPENTIER M A, GROFFMAN P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(D17): 18987-18995.
- [9] HUO Z, SHAO M A, HORTON R. Impact of gully on soil moisture of shrubland in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2008, 18(5): 674-680.
- [10] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, 87: 357-367.
- [11] ZIADAT F M, TAIMEH A Y, HATTAR B I. Variation of soil physical properties and moisture content along toposequences in the arid to semiarid area. *Arid Land Research and Management*, 2010, 24: 81-97.
- [12] AN S S, DARBOUX F, CHENG M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 2013, 209-210: 75-85.
- [13] 孙龙, 张光辉, 王兵, 等. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 191-197. [SUN L, ZHANG G H, WANG B, et al. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10): 191-197.]
- [14] CHEN X Y, ZHOU J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70: 1735-1746.
- [15] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 2007, 80: 75-109.
- [16] ZHANG K, LI S, PENG W, et al. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76: 157-165.
- [17] LI Z W, ZHANG G H, GENG R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 248-257.
- [18] PARSAKHOO A, LOTFALIAN M, ATAOLLAH K, et al. Assessment of soil erodibility and aggregate stability for different parts of a forest road. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(1): 193-200.
- [19] DE BAETS S, POESEN J, GYSSELS G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76: 54-67.
- [20] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究: 以南小河流域为例. *水利学报*, 2017, 48(6): 678-688. [XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Impacts of land use change and climate variation on green water in the Loess Plateau Gully region: A case study of Nanxiaohegou Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 678-688.]
- [21] 康宏亮. 黄土高原沟壑区土地利用方式对沟头溯源侵蚀过程的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [KANG H L. Effect of landuse on gully headward erosion process in the gully region of the Loess Plateau. Yangling: Northwest A&F University, 2017.]
- [22] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2014, 116: 51-59.
- [23] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64: 77-96.
- [24] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion-sediment yield models. *Soil Technology*, 1997, 11(1): 43-55.
- [25] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [26] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 256-267. [CHEN Z F, SHI D M, JIN H F, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF). *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(3): 256-267.]
- [27] LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil. *Catena*, 2017, 153: 61-65.

- [28] BI H, ZHANG J, ZHU J, et al. Spatial dynamics of soil moisture in a complex terrain in the semi-arid Loess Plateau Region, China. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1121-1131.
- [29] ZHENG J Y, WANG L M, SHAO M A, et al. Gully impact on soil moisture in the gully bank. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 339-344.
- [30] 谢云, 刘宝元, 伍永秋. 切沟中土壤水分的空间变化特征. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 278-282. [XIE Y, LIU B Y, WU Y Q. Spatia distributio n of soil m oistures in a gully watershed. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(2): 278-282.]
- [31] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Estimation of spatial soil moisture averages in a large gully of the Loess Plateau of China through statistical and modeling solutions. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 466-478.
- [32] MELLIGER J J, NIEMANN J D. Effects of gullies on space-time patterns of soil moisture in a semiarid grassland. *Journal of Hydrology*, 2010, 389: 289-300.
- [33] DUAN L X, HUANG M B, ZHANG L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 356-366.
- [34] ELSE N E V D, XIE Y, LIU B Y, et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. *Catena*, 2003, 54: 93-115.
- [35] HUPET F, VANCLOOSTER M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*, 2002, 261: 86-101.
- [36] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2019, 174: 24-35.
- [37] YE L P, TAN W F, FANG L C, et al. Spatial analysis of soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China: I. Spatial variability. *Soil & Tillage Research*, 2018, 179: 71-81.
- [38] KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. The effect of conservation tillage on runoff erosivity and soil erodibility during concentrated flow. *Hydrological Processes*, 2008, 22: 1497-1508.
- [39] XIAO L, XUE S, LIU G B. Fractal features of soil profiles under different land use patterns on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(5): 550-560.
- [40] LI Q, LIU G B, ZHANG Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in Hilly Loess Plateau. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(6): 757-764.
- [41] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345-350. [LIU B Y, ZHANG K L, JIAO J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 345-350.]
- [42] 郭明明, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 138-146. [GUO M M, WANG W L, KANG H L, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 138-146.]

Effects of vegetation restoration on soil erodibility on different geomorphological locations in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau

CHEN Zhuo-xin¹, WANG Wen-long^{1,2}, GUO Ming-ming¹, WANG Tian-chao¹,
GUO Wen-zhao¹, WANG Wen-xin¹, KANG Hong-liang¹, YANG Bo³, ZHAO Man¹

(1. State Key Laboratory of Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Vegetation restoration has returned a large number of steep slope farmlands to forests and grasslands, and effectively controlled soil erosion in the Loess Plateau. In the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau, loess-tableland, hill-slope and gully-slope are widely distributed. Geomorphological location and land use may lead to differences in soil properties and vegetation root systems, and thus affect soil erodibility. However, few studies have been conducted to explore the impact of vegetation restoration at different geomorphological locations on soil erodibility, and the relationships between soil erodibility and influencing factors. This study was carried out in the Nanxiaogou watershed in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau. The undisturbed topsoil (0-20 cm) of farmland, grassland, shrub land and woodland was sampled on loess-tableland, hill-slope and gully-slope (no farmland on gully-slope). The comprehensive soil erodibility index (CSEI) was obtained by weighted sum method. The results indicated that: (1) The significant difference in CSEI was found among different geomorphological locations. The CSEI of gully-slope was 8.1% and 77.7% higher than those of hill-slope and loess-tableland, respectively. (2) As for the loess-tableland, the CSEI of grassland, shrub land and woodland decreased by 21.1%, 29.2% and 28.8%, respectively compared with that of farmland. For the hill-slope and gully-slopes, the CSEI of woodland was lower than that of other land use types. (3) The CSEI had significantly negative correlations with clay content, sand content, soil capillary porosity, root weight density, root mean diameter, root length density and root surface area density, but significantly positive correlations with silt content and soil bulk density. Multivariate linear stepwise regression indicates that silt content, root mean diameter and soil bulk density are the most important factors influencing CSEI, among which silt content has the greatest direct influence on CSEI, while root mean diameter exerts negative influence on CSEI through direct or indirect effects. This study suggests that shrubs should be the preferred vegetation for vegetation restoration on the loess-tableland. Revegetation with arbor as dominant community may be more effective in controlling soil and water loss on hill-slope and gully-slope.

Keywords: soil erodibility; geomorphological locations; land use; vegetation restoration; soil property; root characteristic; Loess Plateau