

黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中的土壤抗蚀与细沟侵蚀演变^①

韩鲁艳^{1,2}, 贾燕锋^{1,2}, 王宁¹, 焦菊英^{1*}

(1 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 对黄土丘陵沟壑区安塞纸坊沟和县南沟、延安燕沟 3 个流域不同恢复年限的植物群落的土壤抗蚀性和侵蚀程度进行了研究。对 12 个土壤抗蚀性指标进行主成分分析表明, 土壤抗蚀性(主成分综合指数)强弱为灌木群落阶段>多年生草本和蒿类群落阶段>一二年生草本群落阶段, 与一二年生草本群落阶段相比, 灌木群落阶段与多年生草本和蒿类群落阶段的土壤抗蚀性分别增加了 362.29%~673.33% 和 574.71%~930.00%; 野外调查结果分析表明, 随着植被的恢复演替, 土壤侵蚀量呈现明显的下降趋势, 灌木群落阶段的土壤侵蚀量仅为演替初期的 1.42%~5.59%; 通过回归分析, 土壤侵蚀量和水稳性团聚因子, 以及有机质含量之间分别存在极显著与显著相关关系, 鉴于土壤分析的易获性, 可选择>0.5 mm 水稳性团聚体与有机质含量作为反映土壤侵蚀程度的指标。

关键词: 植被恢复; 土壤抗蚀性; 土壤侵蚀; 主成分分析; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S152.3; S157.5

植物群落的演替过程是植物与土壤相互作用的过程^[1], 土壤性质影响着植被的变化, 同时也因植被的变化而发生改变。随着植被的恢复和演替, 土壤的理化性质也发生着相应改变, 土壤结构得到改善, 有机质和养分含量提高, 从而改变着土壤的抗蚀性能和土壤侵蚀程度。植物群落与土壤这种彼此影响、相互促进的作用, 是植被恢复演替的动力。而黄土高原关于植被恢复方面的相关研究主要集中在植物群落的演替动态^[2-5]、结构类型^[6]、生物多样性^[7], 及其与土壤理化特性^[8-10]、土壤微生物^[11-12]、土壤种子库关系^[13]等方面, 而对植被恢复过程中土壤抗蚀性的变化、及其与土壤侵蚀关系的研究较为薄弱^[14-15]。为此, 本文将对黄土高原具有代表性的延安、安塞试区自然恢复植被及其土壤因子进行调查, 分析植被自然恢复过程中的土壤的抗蚀性和侵蚀程度的变化, 以期为黄土丘陵沟壑区控制土壤侵蚀目标植物群落的确定、植被恢复的减蚀效益评价及土壤侵蚀的预测预报提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区选在水土流失严重的黄土丘陵沟壑区的安塞县境内的纸坊沟流域、县南沟流域, 以及延安市宝

塔区的燕沟流域, 属于干旱半干旱气候, 降水量在 500~550 mm, 年际差异较大, 且年内分配严重不均。土壤以黄土母质上发育而来的黄绵土为主, 土质疏松, 土壤抗蚀抗冲性差, 水土流失严重, 属于极强度侵蚀区。植被类型属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区的过渡植被: 森林草原植被^[16]。在 20 世纪 30~70 年代, 毁林开荒, 3 个流域的植被遭到极大程度的破坏, 流域的生态系统严重退化, 水土流失加剧; 自 70 年代以来, 随着生态恢复工程的开展和退耕还林还草和封山育林的实行, 生态环境有所改善^[17]。区内主要有猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemun*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、芨芨草 (*Artemisia giralii*) 和达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 等草本, 及狼牙刺 (*Sophora viciifolia*)、侧柏 (*Platycladus*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、水栒子 (*Cotoneaster multiflorus*) 等灌木组成的处于不同演替阶段的植物群落^[18]。

1.2 样地调查

根据该区不同植被演替阶段主要植物群落的 TWINSPAN 分类结果^[19], 分别按照阳坡和阴坡不同时间序列范围和群落的实际情况, 各植被演替阶段在纸坊沟、县南沟和燕沟流域各取一个样地进行植被样方

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571094, 40771126) 和西北农林科技大学创新团队建设计划项目 (01140202) 资助。

* 通讯作者 (jyjiao@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 韩鲁艳 (1983—), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 主要从事植被恢复与环境效益评价方面研究。E-mail: shuibao-hanluyan@163.com

调查 (表 1)。植被调查包括植物的种类、盖度、数量、高度和频度等, 其中盖度采用目测法, 即两个调查人员

一起目测; 通过访问土地使用者和长者得到样地植被恢复年限; 同时, 对样地的坡位、坡向、坡度等进行记录。

表 1 样地的基本信息

Table 1 Basic information of sampling plots

坡向	编号	取样地点	退耕年限	坡度 (°)	坡位	群落	盖度 (%)
阳坡	S1	纸坊沟	2	30	坡中	猪毛蒿 ¹ + 长芒草 ² + 猪毛菜 ³	10
		县南沟	5~6	20	坡中	猪毛蒿 + 丛生隐子草 ⁴	20
		燕沟	5	25	坡下	猪毛蒿 + 猪毛菜	40
	S2	纸坊沟	8	30	坡中	猪毛蒿 + 苜蓿 ⁵ + 阿尔泰狗娃花 ⁶	30
		县南沟	10	26	坡中	白羊草 ⁷ + 达乌里胡枝子 ⁸ + 丛生隐子草	20
		燕沟	10	16	坡中	猪毛蒿 + 甘草 ⁹	30
	S3	纸坊沟	13	30	坡上	白羊草 + 达乌里胡枝子	65
		县南沟	16~17	21	坡中	白羊草 + 达乌里胡枝子 + 长芒草	45
		燕沟	15~16	35	坡中	铁杆蒿 ¹⁰ + 达乌里胡枝子 + 狼牙刺 ¹¹	25
	S4	纸坊沟	25	30	坡中	狼牙刺 + 芨蒿 ¹² + 铁杆蒿	80
		县南沟	25~26	23	坡中	白羊草 + 达乌里胡枝子 + 长芒草	30
		燕沟	20	25	坡中	达乌里胡枝子 + 长芒草 + 狼牙刺	55
S5	纸坊沟	30	28	坡下	白羊草 + 铁杆蒿 + 达乌里胡枝子	70	
	县南沟	30	25	坡中	达乌里胡枝子 + 白羊草 + 铁杆蒿	40	
	燕沟	30	26	坡上	白羊草 + 狼牙刺 + 铁杆蒿	50	
S6	纸坊沟	老荒坡	25	沟坡	狼牙刺 + 芨蒿 + 铁杆蒿	85	
	县南沟	老荒坡	42	坡中	狼牙刺 + 铁杆蒿 + 芨蒿	70	
	燕沟	55	35	坡中	狼牙刺 + 芨蒿 + 铁杆蒿	70	
阴坡	S7	纸坊沟	2	20	坡中	猪毛蒿 + 狗尾草 ¹³	30
		县南沟	5	20	坡上	香青兰 ¹⁴ + 达乌里胡枝子	30
		燕沟	3	20	坡上	猪毛蒿	15
	S8	纸坊沟	10	25	坡上	猪毛蒿 + 狗尾草	10
		县南沟	10	17	坡中	猪毛蒿 + 丛生隐子草	20
		燕沟	10~12	15	坡上	猪毛蒿 + 苜蓿 + 阿尔泰狗娃花	25
	S9	纸坊沟	20	25	坡中	芨蒿 + 铁杆蒿 + 长芒草	45
		县南沟	15~16	25	坡中	达乌里胡枝子 + 丛生隐子草	25
		燕沟	17	18	坡中	铁杆蒿 + 异叶败酱 ¹⁵	40
	S10	纸坊沟	25	30	坡中	铁杆蒿 + 长芒草	40
		县南沟	24~25	21	坡上	铁杆蒿 + 达乌里胡枝子 + 丛生隐子草	60
		燕沟	25	19	坡下	铁杆蒿	30
S11	纸坊沟	老荒坡	20	坡下	铁杆蒿 + 芨蒿	40	
	县南沟	老荒坡	31	坡上	铁杆蒿 + 芨蒿	35	
	燕沟	35	35	坡中	沙棘 ¹⁶ + 铁杆蒿	70	
S12	纸坊沟	50	20	坡中	黄刺玫 ¹⁷ + 水桐子 ¹⁸	80	
	县南沟	老荒坡	38	坡下	虎榛子 ¹⁹	90	
	燕沟	老荒坡	35	坡上	黄刺玫 + 土庄绣线菊 ²⁰	95	

注: 1-*Artemisia scoparia*; 2-*Stipa bungeana*; 3-*Salsola ruthenica*; 4-*Cleistogenes caespitosa*; 5-*Medicago Sativa*; 6-*Heteropappus altaicus*; 7-*Bothriochloa ischaemum*; 8-*Lespedeza davurica*; 9- *Glycyrrhiza uralensis*; 10-*Artemisia gmelinii*; 11-*Sophora viciifolia*; 12-*Artemisia giralii*; 13-*Setaria viridis*; 14-*Dracocephalum moldavica*; 15-*Patrinia heterophylla*; 16-*Hippophae rhamnoides*; 17-*Rosa xanthina*; 18-*Cotoneaster multiflorus*; 19-*Ostryopsis davidiana*; 20-*Spiraea pubescens*; S1、S2、……S12 表示不同植被恢复时间段的植物群落, 以下表 4 和图 2 相同。

土壤侵蚀量采用容积法测定^[20], 调查样方大小设置为 0.5 m × 0.5 m, 一个样地设 10 个重复, 根据其空间变化分段测量其长、宽和深, 来计算其侵蚀体积, 再换算成土壤侵蚀量, 土壤体积质量采用环刀法测定。

1.3 土壤样品采集与分析

用团粒盒取 0 ~ 20 cm 土层的原状土 (每个样地采集 3 个重复) 来测定土壤物理性质, 即土壤机械组成与微团聚体组成用激光粒度分析仪测定, 土壤水稳性团聚体采用邱林法测定, 土壤大团聚体采用干筛法测定^[21]; 同时, 每个样地按 S 形采样混合土样用于分析土壤有机质, 采用重铬酸钾外加热法测定^[22]。

1.4 土壤抗蚀性指标的选取

根据已有的研究成果^[15, 23-25]及黄土丘陵沟壑区的特点, 选取 <0.05 mm 粉黏粒含量 (%) (X_1)、<0.01 mm 胶体含量 (%) (X_2) 和结构性颗粒指数 (X_3) 作为无机黏粒类指标; 团聚状况 (%) (X_4)、团聚度 (%) (X_5)、分散率 (%) (X_6) 和分散系数 (X_7) 作为微团聚体类指标; >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (%) (X_8)、>0.5 mm 水稳性团聚体含量 (%) (X_9)、平均重量直径 (mm) (X_{10}) 和结构体破坏率 (%) (X_{11}) 作为水稳性团粒类指标; 有机质含量 (%) (X_{12}) 为有机质胶体类指标。其中:

结构性颗粒指数 = 黏粒含量 (<0.001 mm) / 粉粒含量 (<0.001 ~ 0.05 mm) × 100

团聚状况 = (>0.05 mm 微团聚体分析值) - (>0.05 mm 机械组成分析值)

团聚度 = 团聚状况 / (>0.05 mm 微团聚体分析

值) × 100

分散率 = (<0.05 mm 微团聚体分析值) / (<0.05 mm 机械组成分析值) × 100

分散系数 = (<0.001 mm 微团聚体分析值) / (<0.001 mm 机械组成分析值) × 100

平均重量直径 $MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i$, 式中: X_i 为任一

粒级范围内水稳性团粒的平均直径; W_i 为对应于 X_i 的团聚体百分含量 (以小数表示)。

结构体分散率 = >0.25 mm 团粒含量 (干筛-湿筛) / (>0.25 mm 团粒干筛) × 100

1.5 统计分析

用 SPSS 13.0 对 36 个样地的 12 个土壤抗蚀性指标进行主成分分析, 得到各主成分的贡献率和累积贡献率, 以各成分的特征贡献率为权重, 计算主成分综合指数, 来分析不同植被演替阶段土壤抗蚀性。

2 结果与分析

2.1 土壤抗蚀性指标的主成分分析

从主成分分析结果 (表 2) 可以看出, 前 3 个主成分 (Y_1 、 Y_2 、 Y_3) 累积贡献率为 87.9% (分别为 42.099%、28.378%、17.423%), 包含了绝大部分变量的信息, 信息损失量为 12.1%, 满足主成分分析的要求 (主成分的特征值均 >1, 并且主成分的方差累积贡献率 >85%), 所以提取前 3 个主成分, 分析植被恢复过程中土壤抗蚀性变化。

表 2 总方差分析结果

Table 2 Results of total variance analysis

主成分	原始相关矩阵特征值			未旋转的因子载荷的平方和			旋转后的因子载荷的平方和		
	特征值	贡献率 (%)	累积贡献率 (%)	特征值	贡献率 (%)	累积贡献率 (%)	特征值	贡献率 (%)	累积贡献率 (%)
1	5.052	42.099	42.099	5.052	42.099	42.099	4.344	36.201	36.201
2	3.405	28.378	70.477	3.405	28.378	70.477	3.981	33.178	69.379
3	2.091	17.423	87.900	2.091	17.423	87.900	2.222	18.521	87.900

利用 SPSS 中的最大方差法对各因子载荷进行旋转, 根据旋转后的因子载荷矩阵 (表 3), 第一主成分中, >0.5 mm 水稳性团聚体 (0.982)、平均重量直径 (0.96)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量 (0.947) 和有机质含量 (0.862) 的系数较高; 第二主成分中团聚状况 (0.97) 和团聚度 (0.978) 负荷量较高; 第三主成分中 <0.01 mm 的胶体含量 (0.989) 和结构性颗粒指

数 (0.976) 的系数较高。并结合旋转后的因子载荷散点图 (图 1), 第一类为水稳性团聚体因子与有机质含量, 第二类为团聚类因子, 第三类为无机胶粒类因子。

根据主成分分析结果, 计算主成分系数, 得到前 3 个主成分的线性函数表达式: $Y = 0.42099Y_1 + 0.28378Y_2 + 0.17423Y_3$, 然后, 用主成分线性函数计算不同植物群落样地的第一、二、三主成分值。其线性

表 3 旋转后的因子载荷矩阵

Table 3 Rotated component matrix

主成分	抗蚀性指标											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
1	-0.246	-0.096	-0.02	0.146	0.042	-0.18	-0.242	0.947	0.982	0.96	-0.797	0.862
2	0.756	0.08	-0.145	0.97	0.978	-0.953	-0.694	0.066	0.04	0.009	-0.276	0.117
3	0.369	0.989	0.976	-0.145	-0.049	0.185	-0.053	0.024	-0.015	-0.123	0.276	0.04

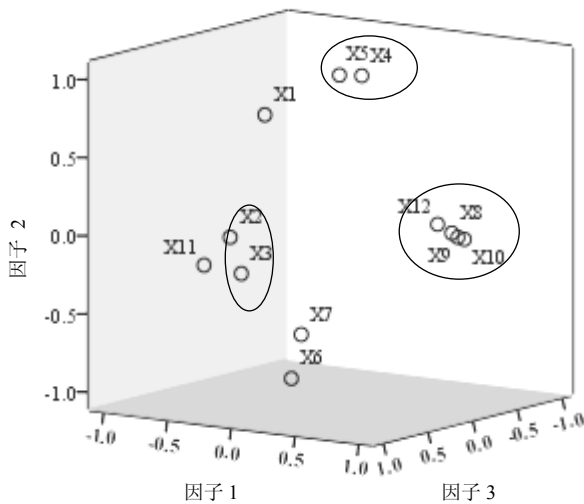


图 1 因子旋转后的因子载荷图

Fig.1 Component plot in rotated space

函数表达式为（用主成分载荷矩阵中的数据除以主成分相对应的特征值开平方根便得每个指标所对应的系数）：

$$Y_1 = 0.079X_1 - 0.092X_2 - 0.122X_3 + 0.305X_4 + 0.265X_5 - 0.315X_6 - 0.252X_7 + 0.331X_8 + 0.339X_9 + 0.333X_{10} - 0.358X_{11} + 0.314X_{12}$$

$$Y_2 = -0.435X_1 - 0.140X_2 - 0.016X_3 - 0.367X_4 - 0.410X_5 + 0.346X_6 + 0.232X_7 + 0.264X_8 + 0.289X_9 + 0.305X_{10} - 0.148X_{11} + 0.214X_{12}$$

$$Y_3 = 0.208X_1 + 0.649X_2 + 0.653X_3 - 0.074X_4 - 0.026X_5 + 0.095X_6 - 0.075X_7 + 0.170X_8 + 0.150X_9 + 0.073X_{10} + 0.056X_{11} + 0.167X_{12}$$

从第一主成分来看，水稳性团聚体含量越高，有机质越多，平均重量直径越大，结构体破坏率越小，主成分 Y_1 就越大，土壤抗蚀性就越强；从第二主成分来看，团聚状况越好，团聚度越大，分散率越小，分散系数越低，主成分 Y_2 就越大，土壤抗蚀性就越强；从第三主成分可以看出，无机胶粒含量越高，结构性颗粒指数越大，土壤抗蚀性将增强。因此，可以根据

3 个主成分的贡献率计算主成分综合指数，来评价植被恢复过程中的土壤抗蚀性的大小。

2.2 植被演替过程中土壤抗蚀性的演变

依据主成分综合指数（表 4），在阳坡植被演替过程中，与演替初期退耕 2~5 年猪毛蒿群落相比，各个演替阶段土壤抗蚀性均有所增加，但增加幅度不同，依次增加了 18.20%、140.24%、350.05%、362.29%、574.71%，即以狼牙刺为建群种的灌木群落阶段的抗蚀性最好，而以猪毛蒿为优势种的草本群落阶段的土壤抗蚀性最差；阴坡植被演替过程中土壤抗蚀性变化也呈现出基本相同的变化趋势，与演替初期的猪毛蒿群落相比，各不同退耕年限演替阶段（S8、S9、S10、S11、S12）土壤抗蚀性主成分综合指数分别增加了 110%、463.33%、356.67%、673.33%、930.00%，同时表明在植被演替初期，土壤抗蚀性的增强较快，而后，随着植被的进一步演替，土壤抗蚀性的变化相对变缓。总之，在植被的演替过程中，土壤抗蚀性呈现出一、二

表 4 不同植被恢复阶段样地的土壤抗蚀性主成分分析综合指数

Table 4 Comprehensive index of anti-erodibility of sampling plots at different vegetation restoration stage

样地	主成分指数			
	Y_1	Y_2	Y_3	Y
S1	-1.50	-2.15	0.92	-1.08
S2	-1.66	-1.08	0	-1.00
S3	-0.87	-0.78	0.55	-0.49
S4	0.61	0.47	0.01	0.39
S5	0.56	0.74	-0.03	0.44
S6	2.68	0.66	0.12	1.34
S7	-1.38	-1.53	-1.05	-1.20
S8	-2.11	0.43	-0.59	-0.87
S9	-0.48	1.05	0.53	0.19
S10	-0.47	0.66	-0.68	-0.13
S11	1.02	1.54	-0.29	0.82
S12	3.58	0	0.51	1.59

年生草本植物群落阶段-多年生草本和蒿类阶段-灌木草原阶段逐渐增加的趋势。在土壤抗蚀性的评价中,综合指数越高,土壤抗蚀性越强;但综合指数为负,并不说明土壤抗蚀性是负的,只表明土壤抗蚀性的相对位置关系,若主成分综合指数为负,则表明土壤抗蚀性水平低于平均水平;评价值为正,则表明土壤抗蚀性高于平均水平,正负不表示实际意义,只表示相对大小,是评价指标标准化的结果。

2.3 植被恢复过程中土壤侵蚀量的变化

由图2可以看出,在植被的演替过程中,土壤侵蚀量整体上呈明显的减小趋势。其中,在阳坡不同植被演替阶段中,以狼牙刺为建群种灌木群落和以白羊草为优势种的多年生草本群落的土壤侵蚀量分别为

1.22 t/hm²和 8.86 ~ 25.39 t/hm²,仅为演替初期以猪毛蒿为优势种的一二年生草本群落土壤侵蚀量的 1.42%和 10.28%~29.47%;阴坡植被演替过程中,以黄刺玫和虎榛子为建群种的灌木群落(2.58 t/hm²)和以铁杆蒿和芨芨草为优势种的多年生草本群落(10.29 ~ 23.42 t/hm²)的土壤侵蚀量仅为演替初期的 5.59%和 22.32%~45.59%。同时可以看出,在植被演替初期,土壤侵蚀量的减小趋势比较大,而且阳坡的土壤侵蚀量(119.17 t/hm²)远远大于阴坡的土壤侵蚀量(50.76 t/hm²),比其多 68.41 t/hm²,而后随着植被演替的进行,当植被恢复到 30、40 年以后,土壤侵蚀量的减小趋势趋于平缓,而且阴阳坡之间的土壤侵蚀量相差不大,仅为 1.36 t/hm²。

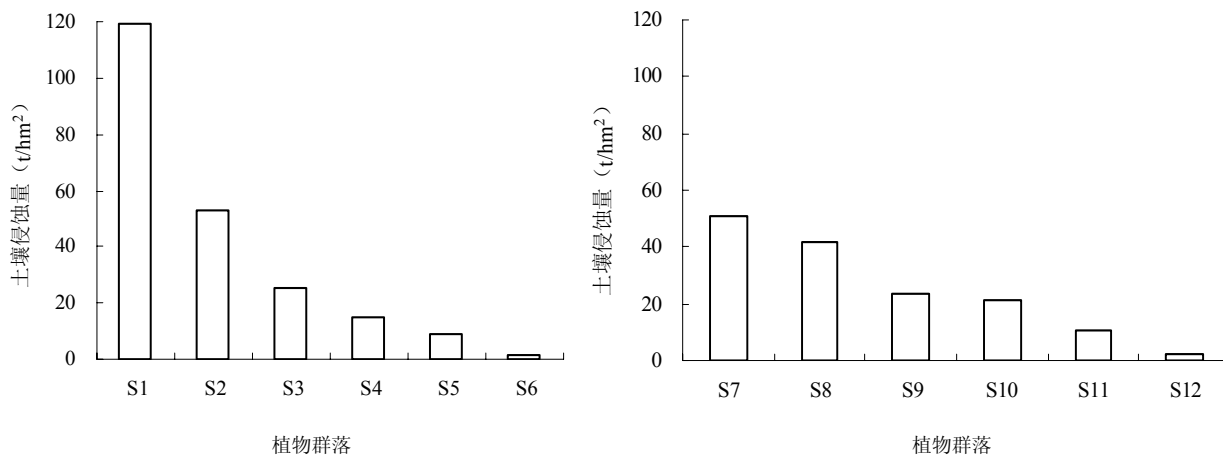


图2 植被演替过程中土壤侵蚀量变化

Fig. 2 Variation of soil erosive amount during vegetation succession

2.4 土壤侵蚀量与土壤抗蚀性指标的关系

由以上的分析可知,随着植被演替的进行,土壤抗蚀性逐渐增强,而土壤侵蚀量逐渐减小,即土壤抗蚀性越强,土壤侵蚀量越小。因此,选择土壤侵蚀量和土壤抗蚀性指标进行相关分析,结果表明:土壤侵蚀量与>0.25 mm水稳性团聚体含量、>0.5 mm水稳性团聚体含量和平均重量直径存在极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.791、-0.813、-0.831;与有机质含量之间存在显著负相关关系,相关系数为 -0.649;与结构体破坏率之间存在极显著正相关关系,相关系数为 0.756,而与其他指标间相关性不显著。经回归分析,各抗蚀性指标与土壤侵蚀量间呈显著或极显著的指数函数关系(表5)。可见,水稳性团聚体含量与土

壤有机质含量可以较好地反映土壤侵蚀程度,鉴于土壤分析的易获性,可选择>0.5 mm水稳性团聚体含量和土壤有机质含量作为体现土壤侵蚀程度的指标。

表5 土壤侵蚀量与各土壤指标回归方程

Table 5 Regression analyses between soil erosive amount and soil indexes

自变量	回归方程	复相关系数
>0.25 mm 水稳性团聚体含量	$y = 3033e^{-0.098x}$	0.807**
>0.5 mm 水稳性团聚体含量	$y = 2007e^{-0.098x}$	0.839**
平均重量直径	$y = 983e^{-2.057x}$	0.846**
结构体破坏率	$y = 174e^{0.093x}$	0.785**
有机质含量	$y = 141e^{-0.193x}$	0.767*

注: ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著, * 表示相关系数在 0.05 水平上显著。

3 结论与讨论

(1) 通过主成分分析, 计算土壤抗蚀性主成分综合指数, 分析了植被恢复过程中土壤抗蚀性的变化, 结果表明: 在阳坡和阴坡的植被演替序列中, 土壤抗蚀性均表现出按照一、二年生草本植物群落阶段-多年生草本群落阶段-灌木群落阶段逐渐增强的趋势。阳坡土壤抗蚀性主成分综合指数由 -1.08 增加到 0.44 和 1.34, 分别增加了 362.29% 和 574.71%; 阴坡土壤抗蚀性主成分综合指数由 -1.20 增加到 0.82 和 1.59, 分别增加了 673.33% 和 930.00%。这是由于随着退耕地的植被恢复和演替, 土壤中植物枯落物大量累积, 加之植物根系穿插及分泌物固结植物残体, 加速了有机质的积累^[27-28], 而有机质是水稳性团聚体形成的胶结体, 促进小粒径水稳性团聚体的累积, 转变成大团聚体, 改善土壤结构^[9, 29]; 同时, 植被演替过程中土壤中微生物活动和数量的增加, 进一步促进团聚体的形成^[30-31]。因此, 随着在植被演替后期, 土壤表层结构趋于稳定, 水稳性团聚体含量增加, 特别是 >0.5 mm 水稳性团聚体含量, 从而增强了土壤的抗蚀性。

(2) 随着植被的正向演替, 土壤侵蚀量呈减小趋势, 演替到灌木群落阶段, 地表土壤侵蚀量很小, 仅为 1.22 ~ 2.58 t/km², 为演替初期的 1.42% ~ 5.59%。主要是因为随着植被的演替, 物种数不断地增加^[32], 植物的地上和地下生物量也随之增大, 植被盖度增大, 植被的冠层和枯落物对降雨的截留作用减少了雨滴动能^[33-34], 避免了对土壤结构的直接破坏, 提高了土壤的入渗性能^[35], 从而提高了土壤的抗蚀和抗冲性, 减轻了土壤侵蚀的程度。

(3) 土壤侵蚀量与水稳性团聚类因子、有机质含量之间存在极显著和显著相关关系, >0.5 mm 水稳性团聚体含量与有机质含量能够较好地反映土壤侵蚀和土壤抗蚀性的总体变化趋势, 可作为评价土壤侵蚀程度的指标。

参考文献:

- [1] West DC. Forest Succession Concept and Application. New York: Springer-Verlag, 1981: 189-211
- [2] 邹厚远, 程积民. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节. 水土保持研究, 1998, 5(1): 126-138
- [3] 邹厚远, 刘国彬. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8
- [4] 朱志诚, 黄可. 陕北黄土高原森林草原地带植被恢复演替初步研究. 山西大学学报(自然科学版), 1993, 16(1): 94-100
- [5] 朱志诚. 陕北黄土高原森林区植被恢复演替. 西北林学院学报, 1993, 8(1): 87-94
- [6] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557
- [7] 郝文芳, 梁宗锁, 陈存根, 龙唐. 黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究. 草业科学, 2005, 22(9): 1-8
- [8] 朱志诚. 陕北黄土高原植被基本特征及其对土壤性质的影响. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(3): 280-286
- [9] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵沟壑区植被恢复的土壤水稳性团聚体效应. 水土保持学报, 2002, 16(1): 48-50
- [10] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5
- [11] 张成娥, 陈小利. 黄土丘陵区不同撂荒年限自然恢复的退化草地土壤养分酶活性特征. 草地学报, 1997, 5(3): 195-200
- [12] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 赵伟峰. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变. 水土保持学报, 2007, 21(1): 152-155
- [13] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地的土壤种子库特征. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 65-72
- [14] 张振国, 黄建成, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性能研究. 水土保持研究, 2007, 14(4): 75-79
- [15] 张振国, 范变娥, 白文娟, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性研究. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 7-13
- [16] 高旺盛, 董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价—以安塞县为例. 自然资源学报, 2003, 18(2): 182-188
- [17] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992: 45-69
- [18] 梁一民. 黄土高原植被建设. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 38-42
- [19] 张振国. 黄土丘陵沟壑区撂荒地植物群落特征及环境解释(硕士学位论文). 杨凌: 中国科学院水土保持研究所, 2007: 28-45
- [20] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨. 水土保持通报, 1989, 9(4): 41-45
- [21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 34-88
- [22] 孙鸿烈, 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 32
- [23] 胡建忠, 张伟华, 李文忠, 郑佳丽, 张春霞. 北川河流域退耕地植物群落土壤抗蚀性研究. 土壤学报, 2004, 41(6): 854-863
- [24] 王佑民, 郭培才. 黄土高原土壤抗蚀性研究. 水土保持学报, 1994, 8(4): 11-16
- [25] 高维森, 王佑民. 黄土丘陵区柠条林地土壤抗蚀性规律研究. 西北林学院学报, 1991, 6(3): 70-78

- [26] 高维森. 土壤抗蚀性指标及其适用性初步研究. 水土保持学报, 1991, 5(2): 60-65
- [27] 李勇, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究. 中国科学: B 辑, 1992(3): 254-259
- [28] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37
- [29] 吴彦, 刘世全, 付秀琴. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49
- [30] 尹瑞龄. 微生物与土壤团聚体. 土壤学进展, 1985(4): 24-29
- [31] 程丽娟, 来航线. 微生物对土壤团聚体形成的影响. 西北农业大学学报, 1994, 22(4): 93-97
- [32] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 焦菊英. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响. 草业学报, 2007, 16(1): 16-23
- [33] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110
- [34] 王晗生, 刘国彬. 植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 62-68
- [35] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响. 自然资源学报, 2003, 18(5): 529-535

Soil Anti-Erodibility and Soil Erosion Evolution of During Process of Vegetation Recovering in Loess Hilly-Gully Region

HAN Lu-yan^{1,2}, JIA Yan-feng^{1,2}, WANG Ning¹, JIAO Ju-ying¹

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;* 2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: This study was aimed to explore the interaction between the development of vegetation succession and the soil anti-erodibility in hilly-gully regions based on the investigation carried out under different vegetation types in three watersheds of Loess Plateau. Principal component analysis (PCA) was used to study the soil anti-erodibility, PCA comprehensive exponent of anti-erodibility indexes showed an order of anti-erodibility as shrub community > perennial herb and artemisia community > annual and biennial herbs community, compared with annual and biennial herbs community, the anti-erodibility of shrub community and perennial herb and artemisia community increased 362.29% ~ 673.33% and 574.71% ~ 930.00% respectively; Field investigation showed soil erosive amount decreased with vegetation succession, and the amount of soil erosion in shrub community plots was only 1.42% ~ 5.59% of early succession plots; Regression analyses indicated that both water stable aggregates and organic matter were closely correlated to soil erosive amount. The organic matter content and >0.5 mm water-stable aggregates could be selected as indexes to indicate soil erosion degree due to the easy-acquirement.

Key words: Vegetation restoration, Soil anti-erodibility, Soil erosion, Principal component analysis, Loess hilly-gully region