

黄土丘陵沟壑区退耕草地土壤质量演变

潘成忠^{1,2}, 上官周平^{1*}, 刘国彬¹

(1. 中国科学院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;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以黄土丘陵沟壑区土壤的主要功能为依据,选取12个代表性土壤指标,采用因子分析方法析取控制土壤质量的公共因子,分析退耕草地土壤质量的演化机理。结果表明,退耕草地土壤质量的主要影响因子依次为土壤腐殖质因子、水土保持因子和力学因子。永久草地和退耕20a荒坡草地的表层(0~10cm)土壤质量最佳,且均随土层深度的增大而降低。农地40~50cm和0~10cm土层土壤质量最差,但其成因不同,前者主要是腐殖质条件差引起的,而后者主要在于较差的水土保持和力学性能。与农地相比,草地坡面的土壤质量和水土保持性能均显著增强,且荒坡草地的水土保持性能和0~10cm土层土壤质量均随退耕年限的延长而提高。退耕年限(3a)相同的荒坡草地土壤质量显著优于人工草地,但在水土保持性能上前者显著差于后者,这表明人工营造牧草植被不失为控制该区水土流失的一种有效途径。

关键词:土壤质量;水土保持;退耕草地;因子分析;黄土丘陵沟壑区

文章编号:1000-0933(2006)03-0690-07 中图分类号:S152.7 文献标识码:A

Soil quality evolvement of farming-withdrawn grassland in hilly and gully loess regions

PAN Cheng-Zhong^{1,2}, SHANGGUAN Zhou-Ping^{1*}, LIU Guo-Bin¹ (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling Shaanxi, 712100, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 100049, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 690-696.

Abstract: It is one of the most important roles of soil in hilly and gully loess regions to reduce or control soil and water loss. The soil samples were taken from 0~50 cm soil at an interval of 10 cm in permanent grassland, 20-year, 8-year and 3-year farming-withdrawn grasslands, 3-year artificial grassland and farmland (Control). Twelve representative soil parameters were chosen to screen the main factors affecting soil quality by factor analysis, and therewith analyze the soil quality evolvement of grassland. The results showed that, soil quality mainly depended on the factors concerned with soil humus, water and soil conservation and soil mechanics. Permanent grassland showed the best humus conditions in 0~10 cm soil and its soil upper layers were better than its lower layers in humus conditions. Compared with farmland, farming-withdrawn grasslands presented greatly increased soil humus, especially in 0~10 cm soil. 3-year farming-withdrawn grassland had better humus conditions in the soil layer spanning from 20 to 50 cm than the other farming-withdrawn grasslands. Grasslands clearly got their soil- and water- conserving capability improved, and the improvement in their water- and soil-conserving capability become weak with increased soil depth. The longer the grasslands were withdrawn from farming, the better they conserved soil and water. Farmland showed the poorest mechanical soil properties in 0~10cm soil and this was mainly because soil tillage damaged soil cohesion. Because of its loose soil conditions,

基金项目:国家重大基础研究资助项目(2002CB111502);中国科学院知识创新重大资助项目(KZCX1-6);中国科学院西部之光人才培养计划资助项目

收稿日期:2005-04-28;修订日期:2005-08-30

作者简介:潘成忠(1980-),男,江苏灌云人,博士,主要从事水土保持和生态水文研究. E-mail: mlpcz@sina.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shangguan@ms. iswc. ac. cn

Foundation item: The project was supported by the National Key Basic Research Project (No. 2002CB111502) and the CAS Knowledge Innovation Project (No. KZCX1-6)

Received date: 2005-04-28; Accepted date: 2005-08-30

Biography: PAN Cheng-Zhong, Ph.D., mainly engaged in soil and water conservation and ecological hydrology. E-mail: mlpcz@sina.com

permanent grassland presented poorer mechanical properties than farming-withdrawn grasslands did.

Permanent and 20-year farming-withdrawn grassland showed the ablest soil quality in 0 ~ 10 cm soil among the various lands, and their soil quality declined with soil depth. Farmland showed the poorest soil quality in the soil layer spanning from 40 to 50 cm and 0 to 10 cm, but the reasons for the poorest soil quality differed between them, the former poor quality resulting from poor humus conditions and the latter being caused by poor soil and water conservation and poor soil mechanical properties. 3-year farming-withdrawn land presented slightly different qualities among different soil layer. Both farming-withdrawn and artificial grasslands got notably improved in soil quality, especially in 0 ~ 20 cm soil. Soil quality of farming-withdrawn grasslands got improved in 0 ~ 10 cm soil layer as the farming-withdrawing period continued. Under the same farming-withdrawing period (3 years), farming-withdrawn grasslands presented better soil quality than artificial grassland, but the latter capability of soil and water conservation was notably superior to the former's. This suggested that it should be an effective approach of controlling water and soil losses in the regions to construct artificial grasslands.

Key words: soil quality; soil and water conservation; farming-withdrawn grassland; factor analysis; hilly and gully loess region

土壤质量由其功能所决定,一般意义上土壤质量指土壤肥力质量、环境质量和健康质量 3 个方面的综合^[1]。黄土高原丘陵沟壑区地处我国从半湿润半干旱向干旱荒漠过渡的地带,植被稀少,生产力低下,生态环境极为脆弱,是世界上水土流失最为严重的地区之一,控制水土流失是该区实现社会与经济可持续发展的首要问题。因此,衡量该区土壤质量的标准不是传统意义上的土壤肥力,而应充分考虑土壤在控制水土流失中的环境质量和健康质量。

近年来土壤质量研究取得了明显进展,其内涵和外延都在不断的丰富和拓展^[1-5]。黄土丘陵沟壑区土壤环境的极端脆弱性给合理评价该区土壤质量问题提出新的挑战^[6,7],研究表明该区严重的土壤侵蚀导致土壤物理、化学与生物学特性的退化^[8]。随着国家生态环境工程的实施,草地应作为该区植被建设中的先锋植物得到恢复和营建^[9]。草地植被恢复对土壤质量的影响如何,是采取人工营造还是进行自然修复,这些都是目前生态环境建设中亟待解决的科技问题。因此研究退耕草地土壤质量的演化,通过土壤质量对退耕草地土壤恢复做出全面合理的评价并寻求恢复和改善土壤质量的对策,对该区生态环境建设及社会经济的可持续发展均具有重要的理论与实践意义。

本文通过对黄土丘陵区不同退耕年限的荒坡草地与人工草地土壤观测指标进行因子分析,利用方差最大正交旋转方法提取影响该区土壤质量的公共因子,进而阐明退耕草地土壤质量的演化以及影响机理,其结果不仅可以丰富土壤学研究的内涵,而且可为黄土区生态恢复重建提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验样地选在中国科学院安塞水土保持生态站,位于黄土高原中部,属典型的梁峁状丘陵沟壑区,海拔 1068 ~ 1039m,区内年均气温 8.8℃,年内总辐射量 552.68kJ/cm²,多年平均降雨量 541mm。土壤为黄绵土,植被类型为暖温带森林草原,天然森林植被已全部破坏。

1.2 供试材料

测定样地为该站定位观测场不同退耕年限草地以及三龄沙打旺人工草地,以目前耕种农地为对照(表 1)。每一样地从表层开始每隔 10cm 取样,共取 5 层分别进行指标测定。

1.3 土壤观测指标选择与测定

针对研究区水土流失严重的特点以及土壤的主要功能,本研究除选取土壤的一些常规理化指标外,还选取了反映土壤侵蚀性能的指标,如土壤渗透系数、抗冲性、抗蚀性以及与土壤坡面滑塌有关的抗剪强度等^[8,10-16],共 12 个原始观测指标(表 2),以期较为全面地对该区的土壤质量进行评判,并进一步阐明不同退耕草地土壤质量的演变规律。

(1) 物理特性 土壤容重采用环刀法测定。水稳性团聚体分 > 5mm、5 ~ 2mm、2 ~ 1mm、1 ~ 0.5mm 和 0.5

~0.25mm 等 5 个等级,采用改进的 Yoder 法测定。平均质量直径指各粒级水稳性团粒直径以其质量百分比为权重而求得的平均值。

表 1 研究样地特征

Table 1 The characteristics of the studied sample lands

样地代号 Code	样地 Land use	退耕年限 Farming-with drawn years	优势种 Dominant species	坡度 (°) Slope gradient	坡向 Aspect	盖度 (%) Coverage
UGF	荒坡草地	永久 Forever	茭蒿 <i>A. giraldii</i> 、铁秆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	35	N	90
UG20	荒坡草地	20	铁秆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza inschanica</i>	29	NE	60~70
UG8	荒坡草地	8	铁秆蒿 <i>A. gmelinii</i> 、茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	29	NE	35
UG3	荒坡草地	3	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	29	NE	20~25
C	农地	—	谷子 <i>Millet</i>	20	NE	—
AG3	人工草地	3	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	33	NE	85

荒坡草地-Uncultivated grassland; 农地-Farmland; 人工草地-Artificial grassland

(2) 生物化学特性 土壤腐殖质物质主要包括:腐殖质、胡敏酸、有机质和富啡酸,均采用科诺诺娃提出的快速测定法^[17]。全氮用半微量开氏法测定。

(3) 抗冲性能 土壤的抗冲性测定采用原状土冲刷槽法进行测定^[13]。

(4) 渗透性能 土壤的入渗性能采用大型渗透桶法测定^[18],并根据试验时的水温换算成 10℃ 条件下的渗透系数 K_{10} 。

(5) 抗剪性能 土壤的抗剪强度 S_1 利用直剪仪采用固结快剪法测定,土壤的凝聚力 C 利用剪应力与垂直荷载进行回归分析确定。

表 2 黄土丘陵沟壑区土壤质量观测指标

Table 2 Determined soil indexes of soil quality in hilly and gully loess region

物理指标 Physical index	生物化学指标 Biotical and chemical index	其它 Other index
容重 BD Bulk density (X_1)	腐殖质 HS Humic substance (X_8)	抗冲性 AC Anti-scourability (X_2)
>0.25mm 水稳性团粒含量 WSA Water stable aggregate of >0.25mm (X_6)	胡敏酸 HA Humic acid (X_9)	渗透系数 K_{10} Infiltration coefficient (X_3)
水稳性团聚体平均质量直径 DCP Average weight diameter of aggregate (X_7)	富啡酸 FA Fulvic acid (X_{10})	抗剪强度 S_1 Shearing strength (X_4)
	有机质 OM Organic matter (X_{11})	凝聚力 C_0 Cohesion (X_5)
	全氮 TN Total N (X_{12})	

2 结果与分析

2.1 土壤质量评价指标析取

2.1.1 土壤质量观测指标的因子分析 因子 1 占总方差的比重远大于其它 3 个因子,其控制总变异的 60% 以上(表 3)。

表 3 土壤质量因子分析方差解释

Table 3 Total variance explained in factor analysis of soil quality

因子 Component	初始相关矩阵析出因子 Extraction sums of squared loadings			旋转载荷阵析出因子 Rotation sums of squared loadings		
	特征值 Total	贡献率 of variance (%)	累计贡献率 Cumulative (%)	特征值 Total	贡献率 of variance (%)	累计贡献率 Cumulative (%)
1	7.307	60.889	60.889	5.395	44.961	44.961
2	1.727	14.395	75.284	2.766	23.048	68.010
3	0.995	8.292	83.576	1.525	12.712	80.722
4	0.869	7.244	90.82	1.212	10.098	90.820

4个因子的累计方差贡献率达90.82%,说明采用4个彼此独立的因子可以反映各土壤各指标分量总变异的90%以上。

除 X_2 、 X_6 和 X_7 指标外,其它各变量的共同度均在85%以上(表4),说明该4个因子不仅能有效地反映原观测指标的总变异,而且能很好地代表各分量的变异信息。

在不损失总变异信息的基础上,采用方差最大法对载荷阵进行正交旋转变换,从而使各析出因子具有更加明确的土壤学意义。

表4 土壤质量分析中前4个因子的再生相关阵和旋转后矩阵的因子荷载
Table 4 Extraction and rotated component matrix in factor analysis of soil quality

指标变量 Index	因子荷载 Component loading				旋转后因子荷载 Rotated component loading				共同度 Communalities(%)
	1	2	3	4	1	2	3	4	
BD (X_1)	-0.141	0.512	0.795	0.051	-0.105	0.034	0.067	0.949	91.7
AC (X_2)	0.819	-0.054	-0.062	0.221	0.564	0.620	-0.009	-0.150	72.6
K_{10} (X_3)	0.863	0.098	-0.079	0.360	0.556	0.739	0.158	-0.098	89.0
S_1 (X_4)	-0.096	0.766	-0.490	0.350	-0.103	0.075	0.970	-0.048	95.9
C_0 (X_5)	-0.149	0.899	0.020	-0.176	0.117	-0.319	0.713	0.489	86.2
WSA (X_6)	0.830	-0.114	0.219	0.243	0.535	0.695	-0.190	0.059	80.9
DCP (X_7)	0.752	-0.081	0.202	0.482	0.353	0.842	-0.092	0.055	84.5
HS (X_8)	0.973	0.064	-0.068	-0.195	0.930	0.349	-0.015	-0.085	99.3
HA (X_9)	0.952	0.058	-0.063	-0.252	0.940	0.292	-0.035	-0.080	97.6
FA (X_{10})	0.919	0.134	0.090	-0.259	0.920	0.284	-0.044	0.093	93.7
OM (X_{11})	0.973	0.065	-0.067	-0.195	0.930	0.349	-0.015	-0.085	99.4
TN (X_{12})	0.972	0.093	-0.039	-0.190	0.929	0.354	-0.003	-0.046	99.0

2.1.2 土壤质量公共因子析取 因子1的方差贡献率为44.963%,在全部因子中处于最重要的地位(表3)。因子1主要综合了腐殖质 X_8 、胡敏酸 X_9 、富啡酸 X_{10} 、有机质 X_{11} 和全氮 X_{12} 这5个指标的变异信息,它们在因子1上的载荷依次为0.8649、0.8836、0.8464、0.8649和0.8630(表4)。因子1主要反映了土壤生物化学特性,特别是腐殖质物质对土壤质量的作用,为此把因子1称作腐殖质因子(F_1)。

因子2的方差贡献率为23.046%(表3),它主要综合了团聚体平均质量直径 X_7 、渗透系数 X_3 、大于0.25mm团聚体百分含量 X_6 和抗冲性 X_2 的变异信息(表4)。在4个指标中,其中 X_7 和 X_6 为土壤团聚状况指标,且它们均是表征土壤抗蚀性的指标之一^[15,19],而渗透系数 X_3 和抗冲性 X_2 分别是衡量土壤的保水和保土性能指标,所以,把因子2称为水土保持因子(F_2)。

因子3和因子4的方差贡献率分别为12.712%和10.098%(表3),二者相差较小,且与前两个因子相比,重要性显著减弱。因子3主要综合了抗剪强度 X_4 和凝聚力 X_5 指标的变异信息,它们在其上的荷载分别为0.9409和0.5084(表4),而因子4主要综合了容重 X_1 和凝聚力 X_5 的变异信息。可见,因子3和4对凝聚力指标进行了分解,使得对各因子的解释显得不很清晰。由于试验样地相邻,土壤的成土条件相似,土壤容重 X_1 近似反映了土壤的抗压性能,而抗剪强度 X_4 和凝聚力 X_5 主要反映了土壤的抗剪性能。同时,考虑 X_1 、 X_4 和 X_5 对原主因子均表现的正向效应以及两个因子相近的方差贡献率。采用土壤力学因子(F_3)以综合考虑因子3和4对土壤质量的影响。

上述分析表明,土壤腐殖质因子、水土保持因子和力学因子不仅反映了原12个指标变量总变异的90.82%,而且能很好地代表各分量的变异信息,且它们均具有较为清晰的土壤学内涵,遂采用上述三个公共因子对退耕草地土壤质量演变进行分析。

2.2 退耕草地土壤质量演变机理

2.2.1 退耕草地土壤评价方法 通过表5的因子得分系数矩阵,分别计算不同样地土壤在因子1、2、3和4的得分 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 。如, $Y_1 = -0.044X_1^* - 0.040X_2^* - 0.102X_3^* - 0.115X_4^* + \dots + 0.238X_{11}^* + 0.236X_{12}^*$,其中 X_i^* 为标准化后的指标变量。

不同样地土壤在腐殖质因子(F_1)和水土保持因子(F_2)上的差异利用 Y_1 和 Y_2 进行评判,而在力学因子(F_3)和综合质量上的得分分别采用 $F_3 = f_3 Y_3 + f_4 Y_4$ 和 $E = f_1 Y_1 + f_2 Y_2 + f_3 Y_3 + f_4 Y_4$ 计算,其中, f_i 为旋转后的因子 i 的方差贡献率。

最后,对同样地土壤在不同因子上的得分进行正规化处理,进而分析土壤质量差异的形成原因。

2.2.2 退耕草地土壤的腐殖质条件 图 1 表明永久荒坡草地表层土壤的腐殖质条件最佳,而人工草地 30~40 cm 土层最差,且同样地上层土壤的腐殖质条件较下层好。

与农地相比,退耕 3a 荒坡草地各土层土壤腐殖质条件显著改善,这与阿拉善荒漠恢复初期草地与封育前相比 0~20cm 与 20~40cm 层土壤有机质和全氮含量显著增加的结论一致^[20]。与农地相比,退耕 20a 和永久荒坡草地土壤腐殖质条件的改善主要表现在 0~10cm 土层。退耕 3a 荒坡草地的 20~50cm 土层土壤腐殖质条件均优于退耕年限更长的荒坡草地,其原因可能是:草地坡面地上和地下生物量随着退耕年限的增大而增加,进而它们需要消耗更多的土壤养分,而腐殖质物质的产生速率没有消耗的快,因而使得土壤下层的腐殖质条件降低。与农地相比,人工草地土壤腐殖质条件并未得到改善。退耕年限相同的荒坡草地腐殖质条件显著优于人工草地。

2.2.3 退耕草地土壤的水土保持性能 永久草地和退耕 20a 荒坡草地的 10~20cm 土层水土保持性能最佳(图 2),这主要在于其较好的团聚性能和抗冲性能。退耕 3a 荒坡草地的 40~50cm 和农地表层的保持水土能力最差,但其成因不同,前者主要与其较差的入渗性能有关,而后者在于其抗蚀抗冲性差。草地坡面保持水土能力显著强于农地,尤其是在 0~20cm 土层。

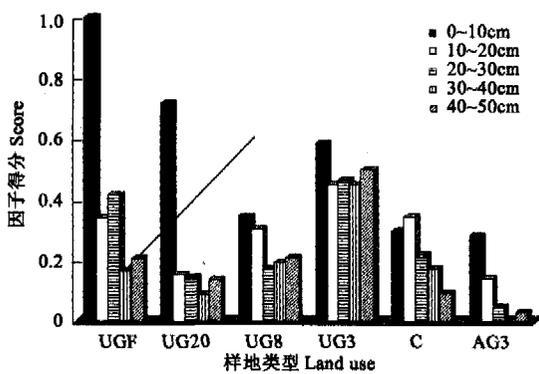


图 1 不同样地土壤的腐殖质状况

Fig. 1 Soil humus conditions of the different sample lands

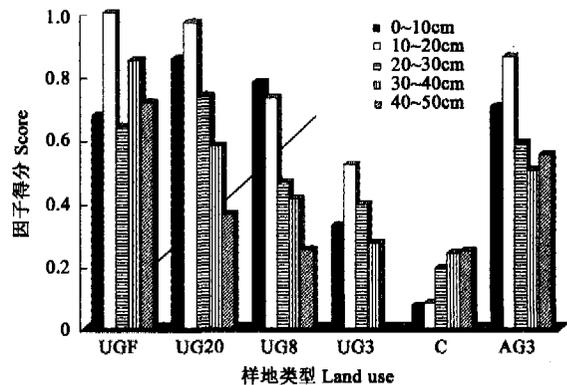


图 2 不同样地土壤水土保持状况

Fig. 2 Soil and water conservation conditions of the different sample lands

草地保持水土性能随土层深度的增大呈减弱趋势(图 2),这可能主要与根系含量随土层深度增大而减小有关^[21,22]。荒坡草地的保持水土性能随着退耕年限的增大而增强(图 2)。退耕年限(3a)相同人工草地的水土保持作用显著优于荒坡草地,这可能与人工草地的土壤中根系含量明显高于荒坡草地有关^[22],试验测定人工草地对应土层的根系表面积含量分别是荒坡草地的 2.3~16.5 倍。

2.2.4 退耕草地土壤力学状况 退耕 3a 荒坡草地的 40~50cm 土层的土壤力学状况最佳(图 3)。农地表层(0~10cm)土壤力学条件最差,这主要是由于农业耕作对表层土壤的扰动破坏了土壤的凝聚性能。农地表层(0~10cm)的土壤凝聚力(0.026 kg/cm²)比退耕 3a 荒坡草地 40~50cm 土壤(0.455 kg/cm²)减少 94.3%。

永久荒坡草地的土壤力学特性较其它退耕年限草地差,这主要与其疏松的土壤条件有关。与农地相比,不同草地表层土壤力学性能显著增强。荒坡草地土壤力学性能随退耕年限变化趋势不明显。除 40~50cm 土层外,退耕年限相同的荒坡草地与人工草地的土壤力学性能差异较小(图 3)。

2.2.5 退耕草地土壤质量评价 永久草地和退耕 20a 荒坡草地的表层土壤质量最佳(图 4)。这与其较好的土壤腐殖质和水土保持性能有关(图 1 和图 2)。农地 40~50cm 土壤质量最差,其次为农地表层土壤,但其成因不同,前者主要由于该层较差的土壤腐殖质条件引起的,而后者主要在于其较差的水土保持和力学性能(图 2 和图 3)。

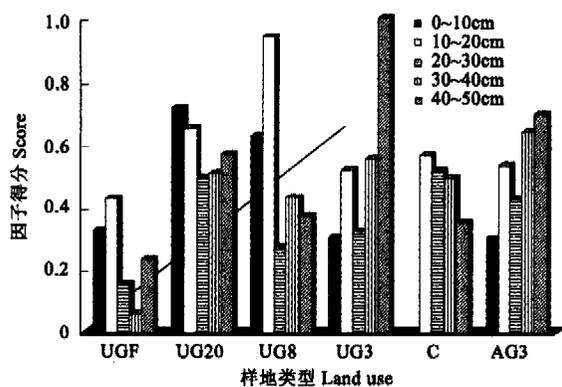


图 3 不同样地土壤力学状况

Fig.3 Soil mechanics conditions of the different sample lands

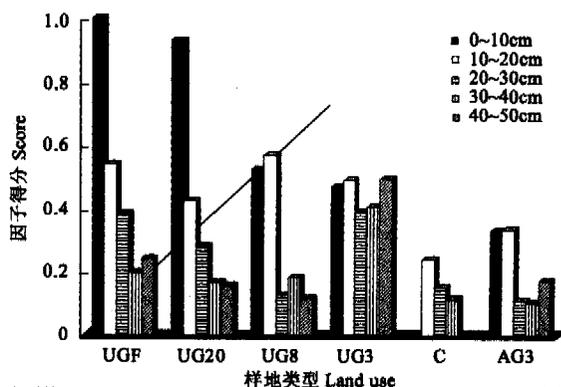


图 4 不同样地土壤质量状况

Fig.4 Soil quality conditions of the different sample lands

与农地相比,不同草地的土壤质量显著改善,尤其在 0~20cm 土层(图 4)。Wu 和 Tiessen 对中国甘肃高山退化草地研究也表明,草地的退化和开垦不仅加速了土壤侵蚀,而且降低了土壤肥力^[23]。

永久草地和退耕 20a 荒坡草地的土壤质量随土层深度的增大而下降,这主要是由于土壤腐殖质因子和水土保持因子所共同引起的(图 1 和图 2)。土壤质量随土层的变化与根系含量变化趋势一致,二者的相关系数分别为 0.943 和 0.962。这也间接说明,对于退耕年限较长的草地,根系不仅增强了其水土保持性能,还同时改善了土壤的腐殖质条件^[11]。退耕 3a 荒坡草地土壤质量在不同土层上差异较小,且与其腐殖质条件变化一致,这是由于其水土保持性能与力学性能互为消长的结果。退耕年限(3a)相同的荒坡草地土壤质量显著优于人工草地,这主要是由于土壤腐殖质因子引起的,而在保持水土的功效上前者甚至比后者差。

3 结论

本文以黄土高原丘陵沟壑区土壤的主要功能为依据,选取 12 个代表性土壤指标对该区退耕草地的土壤质量演变进行分析。研究表明,影响该区土壤质量的因子按权重由大到小依次为土壤腐殖质因子、水土保持因子和力学因子。永久草地和退耕 20a 荒坡草地的表层土壤质量最佳,且随土层深度的增大而降低。农地 40~50cm 和 0~10cm 土层土壤质量最差,但成因不同,前者是由于土壤的腐殖质条件差引起的,而后者在于其较差的水土保持和力学状况。荒坡草地 0~10cm 土层的土壤质量随着退耕年限的增大而提高。退耕 3a 荒坡草地不同土层间的土壤质量和腐殖质条件差异较小,而其相同土层的水土保持与力学性能互为消长。

永久荒坡草地表层土壤的腐殖质条件最佳,而人工草地 30~40 cm 土层最差。与农地相比,退耕 3a 荒坡草地各土层土壤腐殖质条件显著改善,而人工草地的土壤腐殖质条件并未明显改善。退耕 3a 荒坡草地的 20~50cm 土层腐殖质条件均优于退耕年限更长的其它荒坡草地。草地坡面的水土保持性能与农地相比显著增强,且荒坡草地的水土保持性能随着退耕年限的增大而增强。草地保持水土能力随土层深度的增大而降低,这主要与根系分布有关。不同草地表层土壤力学特性较农地显著增强。荒坡草地土壤的力学性能随退耕年限变化趋势不明显,且永久荒坡草地土壤力学特性较其它草地差。

退耕年限(3a)相同的荒坡草地土壤质量显著优于人工草地,这主要是由于土壤腐殖质差异所引起的,而在

保持水土的功效上前者显著差于后者。因此,人工营造牧草植被仍不失为控制该区水土流失的一种有效途径。

References:

- [1] Karlen D L, Mauabach M J, Doran J W, *et al.* Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 4 ~ 10.
- [2] Zhao Q G. Morden soil science and sustainable development of agriculture. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 11 (1): 1 ~ 12.
- [3] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, *et al.* Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec. Publ. 35. Soil Science Society of America, Madison, WI., 1994.
- [4] Doran J W, Jones A J. Methods for assessing soil quality. SSSA Spec. Publ. 49. Soil Science Society of America, Madison, WI., 1996.
- [5] Singer M J, Ewing S. Soil Quality. In: Sumner M E ed. *Handbook of Soil Science*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 271 ~ 298.
- [6] Zhao Q G. Development and innovation of modern soil science. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 321 ~ 327.
- [7] He X B. A conceptual framework for modeling soil quality dynamics on Loess Plateau of China. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2003, 1 (3 ~ 4): 304 ~ 307.
- [8] Tang K L. Soil and water conservation in China. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] Cheng J M, Wan H E. Vegetation construction and soil and water conservation on the Loess Plateau of China. Beijing: China Forest Press, 2002. 116 ~ 147.
- [10] Liu G B, Liang Y M. Vegetation restoration and improvement process of soil anti-scouribility in Loess Plateau II. Improvement of soil anti-scouribility during vegetation restoration. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4 (5): 111 ~ 121.
- [11] Liu G B. Vegetation restoration and improvement process of soil anti-scouribility in Loess Plateau III. Effect of vegetation restoration on soil humus and aggregations. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4 (5): 122 ~ 128.
- [12] Zhu X M, Tian J Y. The study on strengthen anti-scouribility and penetrability of soil in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 29 (4): 1 ~ 10.
- [13] Jiang D S. Soil and water loss and its management mode in Loess Plateau. Beijing: China Water Power Press, 1997.
- [14] Torri D. A theoretical study of soil detachability. *CATENA*, 1987, 10: 15 ~ 20.
- [15] Wang Y M, Guo P C, Gao W S. Study on soil anti-erosibility in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8 (4): 11 ~ 16.
- [16] Pan J J, Bergama I E. Determination of soil erosion class using soil infiltration and shear resistance. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9 (2): 93 ~ 96.
- [17] Li X L, Liu Y M. Studies on soil humic substances of soil in Loess area of northwest China. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26 (3): 298 ~ 303.
- [18] Zhang W R, Xu B H. Method of location study on forest soil. Beijing: China Forest Press, 1986.
- [19] Hu J Z, Zhang W H, Li W Z, *et al.* Effect on plant community of anti-erodibility of land under rehabilitation in Beichuanhe Basin. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6): 854 ~ 863.
- [20] Fu H, Chen Y M, Zhou Z Y, *et al.* Change of vegetation and soil environment of desert grassland in the early period of restoration in Alxa, Inner Mongolia. *Journal of Desert Research*, 2003, 23 (6): 661 ~ 664.
- [21] Li Y, Xu X Q, Zhu X M, *et al.* Effect of plant roots on increasing soil permeability on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37: 1735 ~ 1738.
- [22] Li Y, Zhu X M, Tian J Y, *et al.* Preliminary study on mechanism of plant roots to increase the soil anti-scouribility on the Loess Plateau. *Science in China*, 1992, 35: 1085 ~ 1092.
- [23] Wu R G, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in Alpine grassland soil, China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 1648 ~ 1655.

参考文献:

- [2] 赵其国. 现代土壤学与农业持续发展. *土壤学报*, 1996, 11 (1): 1 ~ 12.
- [6] 赵其国. 发展和创新现代土壤科学. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 321 ~ 327.
- [8] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 程积民, 万惠娥. 中国黄土高原植被建设与水土保持. 北京: 中国林业出版社, 2002. 116 ~ 147.
- [10] 刘国彬, 梁一民. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程 II. 植被恢复不同阶段土壤抗冲性特征. *水土保持研究*, 1997, 4 (5): 111 ~ 121.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程 III. 植被恢复对土壤腐殖质物质及水稳性团聚体的影响. *水土保持研究*, 1997, 4 (5): 122 ~ 128.
- [12] 朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透及抗冲性研究. *水土保持学报*, 1993, 29 (4): 1 ~ 10.
- [13] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [15] 王佑民, 郭培才, 高维森. 黄土高原土壤抗蚀性研究. *水土保持学报*, 1994, 8 (4): 11 ~ 16.
- [16] 潘剑君, Bergama I E. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级. *水土保持学报*, 1995, 9 (2): 93 ~ 96.
- [17] 李香兰, 刘玉民. 西北黄土地区土壤腐殖质物质的研究. *土壤学报*, 1989, 26 (3): 298 ~ 303.
- [18] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [19] 胡建忠, 张伟华, 李文忠, 等. 北川河流域退耕植物群落土壤抗蚀性研究. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 854 ~ 863.
- [20] 傅华, 陈亚明, 周志宇, 等. 阿拉善荒漠草地恢复初期植被与土壤环境的变化. *中国沙漠*, 2003, 23 (6): 661 ~ 664.