

晋北黄土丘陵区不同人工植被对土壤质量的影响*

王改玲^{1**} 王青杵²

(¹ 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; ² 山西省水土保持生态环境建设中心, 太原 030002)

摘要 以山西省阳高县大型径流观测场为依托, 选择土壤机械组成、孔隙度、毛管孔隙度、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾 8 项反映土壤特性的因子作为评价指标, 采用主成分分析对裸坡、荒坡、柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和苜蓿 (*Medicago sativa*) 6 种不同植被条件下土壤质量进行综合评价。结果表明: 8 项理化性质指标可归纳为有机质因子、质地因子和孔隙因子 3 个公因子; 柠条、沙棘、油松和苜蓿 4 种人工植被土壤有机质因子和孔隙因子均高于荒地; 除苜蓿外, 其他 3 种人工植被土壤质地因子均高于荒地; 而裸地土壤的 3 个公因子均处于最低水平; 苜蓿、柠条、沙棘、油松、荒地、裸地土壤质量综合指数分别为 0.596、0.584、0.495、0.481、0.305 和 0.194。说明苜蓿、柠条、沙棘和油松 4 种人工植被均能促进土壤质量改善, 其中苜蓿和柠条的优势更明显, 裸坡则使土壤退化。

关键词 土壤质量; 人工植被; 主成分分析; 黄土丘陵区

中图分类号 S157 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)6-1487-05

Effects of artificial vegetation types on soil quality in loess hilly area in Northern Shanxi Province. WANG Gai-ling^{1**}, WANG Qing-chu² (¹*Institute of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China*; ²*Shanxi Centre of Soil and Water Conservation and Ecological Environment Construction, Taiyuan 030002, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(6): 1487–1491.

Abstract: Based on the runoff plots located in Yanggao County, Shanxi Province, the effects of different vegetation types, including bare land, wasteland, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Pinus tabulaeformis* and *Medicago sativa*, on soil quality in loess hilly area in North Shanxi Province were assessed by principal component analysis. The results showed that eight soil physicochemical indicators (soil texture, porosity, capillary porosity, organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolysis nitrogen, available phosphorus and available potassium) could be represented by three common types of soil quality factors, which were organic matter factor, soil texture factor and pore factor. The scores of both the organic matter factor and pore factor under the four artificial vegetation types were all higher than in the wasteland. Except for *M. sativa*, soil texture factor scores under the artificial vegetation were also higher than in the wasteland. Scores of all three common quality indicators in the bare land were the lowest. Soil integrated assessment scores for *M. sativa*, *C. korshinskii*, *H. rhamnoides*, *P. tabulaeformis*, wasteland, and bare land were 0.596, 0.584, 0.495, 0.481, 0.305, and 0.194, respectively. This meant that the four types of artificial vegetation could improve soil quality and *M. sativa* and *C. korshinskii* were more effective than others. Bare land led to soil degradation.

Key words: soil quality; artificial vegetation; principal component analysis; loess hilly area.

土壤质量指土壤在生态系统范围内, 维持生物生产、保护环境质量以及促进动植物健康的能力

* 山西省水利厅横向合作项目“生态环境修复技术在永定河流域示范推广研究”资助。

** 通讯作者 E-mail: gailingwang@qq.com

收稿日期: 2013-11-19 接受日期: 2014-01-17

(Doran & Parkin, 1994)。由于不合理的人类活动所导致的土壤质量退化问题, 已严重的威胁着生态环境和世界农业的可持续发展, 土壤质量问题在全世界受到广泛关注(巩杰等, 2004; 许明祥等, 2005a; 董莉丽和郑粉莉, 2010; 郑粉莉等, 2010)。建设人工

植被是土壤侵蚀区植被恢复、土壤质量提高的主要途径之一。晋北地处山西的北部地区,气候干旱、寒冷,风大风多,植被稀疏,全年风蚀水蚀交替进行,是山西乃至整个华北地区生态环境最为脆弱的区域。为了改善地区生态环境,保障地区经济社会协调发展,2000年国家启动了以植树造林为重点,小流域治理、草地建设等手段综合应用生态环境治理工程。目前,生态建设虽然取得了一定的成效,但水土流失和土地退化等问题依然比较严重,生态环境仍很脆弱。不同植物,由于凋落物数量、组分、分解速率不同,对水土流失的影响不同,因此其土壤质量效应也可能存在较大差异。研究不同人工植被对土壤质量的影响方式和程度,对晋北黄土侵蚀区植被恢复和土壤质量提高具有重要意义,对其他地区退化生态系统植被恢复和土壤保育也具有参考价值。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于阳高县王官屯镇境内,海拔1118~1191 m,地理坐标113.77°E,40.37°N。为黄土缓坡丘陵区,属暖温带干旱、半干旱大陆性季风气候区。年均气温6.9℃,极端最高气温37.5℃,极端最低气温-29.1℃,年>10℃的积温2965℃,年均日照时数2830 h,年太阳辐射总量585.2 kJ·cm⁻²,无霜期136 d,多年平均降水量425 mm,年蒸发量1924 mm,平均风速3.1 m·s⁻¹。试验区土壤属栗钙土。自然植被主要是混生蒿子(*Chrysanthemum coronarium* L.)、狼毒(*Euphorbia fischeriana* Steud.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、芨芨草(*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski)等杂草,植物多样性差,生态环境脆弱。

试验小区布设于2005年5月,共设荒坡区、裸坡区、紫花苜蓿区、沙棘区、柠条区、油松区6个不同植被小区。其中荒坡区不采取任何管理措施,从其他植被开始栽植或播种时开始自然生长;裸坡区采取人工拔草管护;紫花苜蓿采取等高条播,行距0.2 m;沙棘和柠条采取鱼鳞坑整地、直播方式,株行距1 m×1 m;油松采取鱼鳞坑整地、栽植2年生苗木,株行距1.33 m×2.4 m。小区水平投影长20 m,宽5 m,地形坡度8°。

1.2 样品采集和分析

2011年10月5日,在每个小区内按“S”型随机

取耕层(0~20 cm) 5~7个样点混合组成一个混合土样。将土样风干处理后,用于土壤养分与机械组成分析。同时,用环刀在坡上、坡中和坡下不同坡位采集原状土壤样品,测定土壤容重、孔隙度和毛管孔隙度,计算各小区的平均值。

测定土壤有机质、速效氮、速效磷、速效钾含量。有机质含量用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定,全氮含量用半微量凯氏法,速效氮含量用碱解扩散法,速效磷含量用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾含量用醋酸铵浸提-火焰光度计法(鲍士旦,2008)。土壤机械组成用比重计法测定物理性砂粒和物理性粘粒的含量。土壤容重测定用环刀法,土壤总孔隙度通过土壤容重计算得到,毛管孔隙度用圆筒浸透法测定(林大仪,2004)。

1.3 土壤质量评价指标选择及综合指数计算

土壤质量综合评价一般分为3个步骤:评价因子的选择、权重的确定和土壤质量综合指数的计算。由于研究目的和对象不同,不同研究人员对土壤质量的内涵理解不同,评价方法和指标体系也不尽相同。研究区位于晋北黄土侵蚀区,植被对土壤的影响主要表现为:第一,植物根系对土壤养分的吸收及枯落物对养分的归还;第二,植被能控制水土流失,从而影响土壤的质地和结构。因此,本研究中土壤质量主要从肥力质量考虑。本着针对性、有效性以及敏感性和稳定性兼顾的原则,参考已有研究成果(许明祥等,2005;白文娟等,2010;杨越等,2012),选取土壤物理指标中的总孔隙度、毛管孔隙度及机械组成,化学指标中的有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾,作为土壤质量评价指标。采用主成分分析法计算不同植被下的土壤质量综合指数(SQI)。

为了避免计算结果受变量量纲的影响,保证其客观性和科学性,在进行SQI计算之前必须对原始数据矩阵进行标准化处理,即计算各土壤质量指标的隶属度,将评价指标的实测值转换为介于0~1的数值,计算公式为:

$$Q(x_i) = (x_{ij} - x_{i\min}) / (x_{i\max} - x_{i\min}) \quad (1)$$

式中, $Q(x_i)$ 为第*i*项土壤质量评价指标的隶属度值; x_{ij} 为各土壤质量评价指标测定值; $x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别为第*i*项土壤质量评价指标测定值中的最大值和最小值。

由于土壤质量各个因子的状况及重要性不同,通常用权重系数表示各个因子的重要性程度。主成分分析是将多个指标转化为少数几个互相无关的综

合指标的一种多元统计分析方法,其本质是对高维变量系统进行最佳综合与简化降维(林海明和张文霖,2005)。为避免人为因素的干扰,客观地确定各个指标的权重,本研究利用 SPSS 软件对选出的土壤质量评价指标进行主成分分析,从中提取主成分,获得各主成分的方差贡献率、累积方差贡献率;利用土壤质量评价指标在不同主成分中的因子负荷量,计算它们在不同主成分中的权重,计算公式为:

$$W_i = \text{ComponentCapacity}_i / \sum_{i=1}^n (\text{ComponentCapacity}_i) \tag{2}$$

式中, W_i 为在某一主成分中第 i 个土壤质量评价指标的权重; $\text{ComponentCapacity}_i$ 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量评价指标因子负荷量的绝对值。

最后,根据加乘法则,对各个土壤质量指标值采用乘法进行合成,计算不同植被措施各主成分得分及土壤质量综合指数(郑粉莉等,2010),计算公式为:

$$SQI_j = \sum_{i=1}^n (W_i \times Q(x_i)) \tag{3}$$

式中, SQI_j 为第 j 个主成分得分, n 为评价指标个数, W_i 为各指标的权重, $Q(x_i)$ 为各指标的隶属度。

$$SQI = \sum_{j=1}^m (SQI_j \times k_j) \tag{4}$$

式中, SQI 为土壤质量综合指数, m 为主成分个数, K_j 为各主成分的方差贡献率。

2 结果与分析

2.1 不同植被措施对土壤理化性质的影响

土壤孔隙度和大小孔隙分配是土壤重要的物理性质,关系着土壤水、气运动以及对植被养分的供应。由表 1 可知,以荒地为准,苜蓿、柠条、油松和沙棘植被均能降低土壤容重。与土壤容重的变化趋势相反,不同植被均不同程度地提高了土壤孔隙度和毛管孔隙度。其中,苜蓿地土壤总孔隙度为

52.30%,毛管孔隙度 23.70%,较荒地分别提高了 3.8% 和 26.9%。柠条、沙棘和油松地土壤总孔隙度较荒地分别提高了 3.8%、2.7% 和 0.6%;土壤毛管孔隙度较荒地分别提高了 22.6%、15.1% 和 23.2%。与荒坡地相比,柠条、油松和沙棘地土壤物理性粘粒含量升高,苜蓿地略有降低。

植被亦影响了土壤养分含量。苜蓿、柠条、油松和沙棘植被提高了土壤有机质和全氮含量,其中苜蓿的效果最为明显,其次是柠条。苜蓿地土壤有机质含量较荒地提高了 20.9%;全氮含量较荒地提高了 17.7%;柠条地土壤有机质和全氮含量较荒地分别提高了 7.2% 和 7.9%。不同植被小区土壤碱解氮含量均低于荒地。速效磷和速效钾含量则因植被类型的不同而表现出不同的趋势,其中油松使土壤速效磷含量由荒地的 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量则由荒地的 $70.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $55.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。裸坡地土壤总孔隙和毛管孔隙度略高于荒地,全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量则低于荒地土壤。利用公式(1)计算土壤质量指标的隶属度值(表 2)。

2.2 土壤质量主成分提取及主成分因子负荷量、权重

一般认为,在对 n 个指标进行主成分分析时,当前 $j(j < n)$ 个主成分的累积方差贡献率达到 85% 以上时,可认为前 j 个主成分基本反映了原 n 个指标所含的大部分信息,从而可用 j 个彼此不相关的综合因子表达原有 n 个指标的总信息(刘占锋等,2006)。从表 3 可以看出,当主成分个数 $j=3$ 时,累积方差贡献率达到 85.08%,满足分析要求。主成分个数确定后,利用各土壤质量评价指标在不同主成分中的因子负荷量,计算其不同主成分中的权重。结果表明,第 1 主成分中,有机质和全氮具有较高的负荷量和权重。有机质是土壤肥力及环境质量状况的最重要表征,是制约土壤理化性质如水分、通气性、抗蚀力、保肥供肥能力和养分有效性等的关键

表 1 不同植被措施下土壤的理化性质
Table 1 Soil physical and chemical properties under different vegetations

类型	容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	物理性粘粒 (%)	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
裸坡	1.26	52.27	23.65	23.33	7.69	69.07	11.5	0.0	62.9
荒地	1.32	50.37	18.67	25.33	7.48	70.08	22.2	1.4	70.3
苜蓿	1.26	52.30	23.70	24.77	9.04	82.49	18.9	0.0	62.9
柠条	1.26	52.28	22.89	26.67	8.02	75.65	19.7	1.4	66.6
沙棘	1.28	51.75	21.48	26.47	8.04	73.65	14.8	2.2	74.0
油松	1.31	50.69	23.00	26.57	7.90	74.00	16.4	2.8	55.5

表 2 土壤质量指标隶属度
Table 2 Membership function values of soil quality indicators

类型	总孔隙度	毛管孔隙度	物理性粘粒	有机质	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
裸坡	0.985	0.991	0.000	0.135	0.000	0.000	0.000	0.400
荒地	0.000	0.000	0.600	0.000	0.075	1.000	0.500	0.800
苜蓿	1.000	1.000	0.430	1.000	1.000	0.692	0.000	0.400
柠条	0.994	0.838	1.000	0.346	0.490	0.766	0.500	0.600
沙棘	0.718	0.558	0.940	0.359	0.341	0.308	0.786	1.000
油松	0.164	0.860	0.970	0.269	0.367	0.458	1.000	0.000

因素。侵蚀条件下,有机质含量的高低反映了有机物质归还及生物积累的相对强弱,因此可将第 1 主成分称为土壤有机质因子。第 2 主成分中,物理性粘粒和速效磷具有较高的负荷量和权重。侵蚀条件下,物理性粘粒的降低反映了富含养分的细颗粒的流失及土壤保肥能力的降低,可称为土壤质地因子。第 3 主成分中,碱解氮含量、总孔隙度和毛管孔隙度具有较高的负荷量和权重,其中总孔隙度和毛管孔隙度反映了土壤的孔隙大小及分布,影响土壤的通气透水性能及有机质的转化,可称为土壤孔隙因子(表 3)。

2.3 不同植被措施对土壤质量综合指数的影响

根据加乘法则对各个主成分及土壤质量综合指数进行合成,利用式(3)和式(4)计算不同植被下的主成分得分和土壤质量指数(表 4)。结果表明,不同植被措施对 3 个主成分的影响差异较大。土壤有机质因子(F1)得分为苜蓿地>柠条地>沙棘地>油松地>荒坡地>裸坡地,土壤质地因子(F2)得分为油松地>沙棘地>柠条地>荒坡地>苜蓿地>裸坡地,土壤孔隙因子(F3)得分为柠条地>苜蓿地>沙棘地>油

表 3 土壤质量主成分的因子负荷量、权重
Table 3 Values of component capacity, weights of the soil quality indexes

	第 1 主成分		第 2 主成分		第 3 主成分	
	负荷量	权重	负荷量	权重	负荷量	权重
有机质	0.375	0.249	-0.010	0.007	-0.060	0.031
全氮	0.405	0.269	0.062	0.043	-0.135	0.069
碱解氮	0.189	0.125	-0.123	0.087	-0.599	0.307
速效磷	-0.063	0.042	0.528	0.372	0.161	0.083
速效钾	0.039	0.026	0.041	0.029	0.133	0.068
总孔隙度	0.179	0.119	-0.010	0.007	0.395	0.203
毛管孔隙度	0.114	0.076	0.095	0.067	0.344	0.176
物理性粘粒	0.142	0.094	0.550	0.388	0.124	0.064
方差贡献率(%)	46.26		22.71		16.11	
累计方差贡献率(%)	46.26		68.97		85.08	

表 4 不同植被措施下的土壤质量主成分得分和土壤质量综合指数
Table 4 Scores of principal component and soil quality integrated assessment indexes under different vegetations

	裸坡	荒地	苜蓿	柠条	沙棘	油松
第 1 主成分	0.236	0.244	0.850	0.627	0.495	0.441
第 2 主成分	0.086	0.532	0.363	0.745	0.772	0.865
第 3 主成分	0.405	0.446	0.746	0.775	0.566	0.504
SQI	0.194	0.305	0.596	0.584	0.495	0.481

松地>荒坡地>裸坡地。土壤质量综合得分与土壤有机质因子得分顺序相同,亦表现为苜蓿地>柠条地>沙棘地>油松地>荒坡地>裸坡地。以荒地为准,可以看出,人工植被措施能明显改善土壤质量,其中苜蓿的效果最好,土壤质量综合指数为 0.596;其次是柠条,土壤质量指数为 0.584;沙棘、油松亦有较好的效果,人工拔草(裸坡地)则不利于土壤质量的提高,土壤质量综合指数仅为 0.194,较荒坡地(0.305)明显降低(表 4)。

3 讨论与结论

植被生长和土壤-植被系统中的养分循环是影响土壤有机质和其他养分含量的主要原因。苜蓿和柠条在晋北半干旱的条件下,生长旺盛,枯枝落叶丰富。随着枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累和矿化,可以较快地把有机物和无机营养元素归还土壤,进而增加土壤养分,改善土壤的物理化学性质。同时,苜蓿和柠条还能通过生物固氮作用改变根区土壤系统的物质组成、生物活性及肥力水平,使土壤氮含量大幅度增加。因此,土壤有机质和全氮含量以苜蓿区最高,其次是柠条,而其他较低。不同植被区土壤速效钾含量则以沙棘区最高,为 74.0 mg · kg⁻¹,油松区最低,仅 55.5 mg · kg⁻¹,这是因为维持正常生长,中幼林的油松需要大量吸收土壤中钾素。同时,油松属针叶树种,枯落物较少,而且其枯落物中含有不易降解的单宁、树脂等物质,降解速率较慢,这与张俊华等(2003)、巩杰等(2004)的研究结果相似。

增加植被覆盖、控制水土流失是改善晋北黄土坡地土壤结构的重要因子。本研究中,沙棘、柠条均采用 1 m × 1 m 鱼鳞坑直播方式,盖度为 80% ~ 85%;紫花苜蓿采用条播形式,旺盛生长期间其盖度亦可达到为 75% 左右,且枯枝落叶较多。植被冠层、枯枝落叶层能保护土壤,降低雨滴动能、耗散降水径流的侵蚀能量,防治土壤团聚体破碎、表层土壤

孔隙减少或阻塞。另一方面,根系生长扩张挤压土壤、腐烂的枯枝落叶增加土壤有机质,亦能促进团粒结构的形成,从而降低土壤容重、增加土壤孔隙度。因此,苜蓿、沙棘、柠条区土壤容重明显低于荒坡区,而孔隙度和毛管孔隙度明显大于荒坡区,土壤结构明显改善。戴全厚等(2008)研究亦表明,随着植被覆盖度的增加,土壤容重变小,总孔隙度增大,水稳性团聚体含量增多,土壤结构不断改善。张萍和曾信波(1999)研究表明,不同植被类型下,土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度从大到小依次为桦木林、杉木林、柏木林、马尾松林、华山松林、灌丛、草坡。与张萍和曾信波(1999)的研究结果不尽相同,本研究表明,油松林地的孔隙度与荒坡区相近,而毛管孔隙度则明显高于荒坡区,这可能与研究区油松采用 $1.33\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 栽植方式,植被盖度低(65%左右)、枯落物较少有关。

不同植被区水土流失的差异还是影响土壤质地的重要因素。同一试验区植被对水土流失影响的研究表明,6个不同的小区,裸坡区水土流失最为严重,2005—2009 年均径流系数 10.9%,侵蚀模数 $282.0\text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;沙棘、柠条和油松区均能有效地控制水土流失,蓄水能力为 84.8%~95.9%,保土能力达 95.2%~99.7%(王青杵等,2012)。径流流失将带走土壤许多粘粒和粉粒,颗粒较小(Hassan & Majumder, 1990)。裸坡区较严重的水土流失使得土壤物理性粘粒含量较其他植被区明显降低。粘粒含量的降低又降低了土壤对磷钾的吸附能力。因此,由物理性粘粒、速效磷和速效钾构成的土壤质地因子在裸坡区最低,而在沙棘、柠条和油松区明显较高。查小春和唐克丽(2003)研究表明,林地开垦侵蚀 10 年土壤物理性粘粒比林地分别减少 3.01%,土壤向粗骨化趋势发展,与本结果相似。另外,水土流失也是影响土壤养分含量的重要因素。

总之,植被能影响土壤质量因子和综合指数,其中苜蓿最有利于提高土壤有机质含量;柠条对改善土壤孔隙状况具有较大的优势,沙棘、柠条和油松对土壤质地的影响较好,而荒坡和裸坡的 3 个公因子均较低。土壤质量综合指数荒地为 0.305;而在苜蓿区最高,为 0.596;其次是柠条区,为 0.584;沙棘区、油松区分别为 0.495 和 0.481,人工拔草(裸坡

地)仅为 0.194。以荒地作为对照,4 种不同的植被措施均有利于提高土壤质量,其中苜蓿和柠条的优势较明显,而裸露的地表则会使土壤退化。

参考文献

- 白文娟,郑粉莉,董莉丽,等. 2010. 黄土高原地区水蚀风蚀交错带土壤质量综合评价. 中国水土保持科学, 8(3): 28–37.
- 鲍士旦. 2008. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 查小春,唐克丽. 2003. 黄土丘陵林地土壤侵蚀与土壤性质变化. 地理学报, 58(3): 464–469.
- 戴全厚,薛 箴,刘国彬,等. 2008. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应. 中国农业科学, 41(5): 1390–1399.
- 董莉丽,郑粉莉. 2010. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 46(2): 39–44.
- 巩 杰,陈利顶,傅伯杰,等. 2004. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. 应用生态学报, 15(12): 2292–2296.
- 林大仪. 2004. 土壤学实验指导. 北京: 中国农业出版社.
- 林海明,张文霖. 2005. 主成分分析和因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷. 统计研究, 22(3): 65–68.
- 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 2006. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 26(3): 901–913.
- 王青杵,王改玲,石生新,等. 2012. 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. 水土保持学报, 26(2): 71–74.
- 许明祥,刘国彬,赵允格. 2005a. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价. 植物营养与肥料学报, 11(3): 285–293.
- 许明祥,刘国彬,赵允格. 2005b. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究. 应用生态学报, 16(10): 1843–1848.
- 杨 越,哈 斯,孙保平,等. 2012. 植被恢复类型对土壤物理性质的影响研究. 灌溉排水学报, 31(1): 15–18.
- 张 萍,曾信波. 1999. 植被蓄水保土功能研究. 山地农业生物学报, 18(5): 300–304.
- 张俊华,常庆瑞,贾科利,等. 2003. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究. 水土保持学报, 17(4): 38–41.
- 郑粉莉,张 锋,王 彬. 2010. 近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价. 生态学报, 30(22): 6044–6051.
- Doran JW, Parkin TB. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Hassan MM, Majumder AH. 1990. Distribution of organic matter in some representative forest soils of Bangladesh. Indian Journal of Forestry, 13: 281–287.

作者简介 王改玲,女,1971 年生,博士,副教授,主要从事土壤肥力与环境效应研究. E-mail: gailingwang@qq.com

责任编辑 王 伟