

# 黄土高原子午岭地区植被恢复过程中的土壤质量评价

吕春花<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2†</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室: 712100, 陕西杨凌)

**摘要** 选择黄土高原子午岭地区植被自然恢复 1~140 a 不同年限的阳坡梁坡地为研究对象, 通过相关性分析筛选土壤表层(0~20 cm) 16 项表征土壤物理、化学、生物学性质的指标, 运用主成分分析计算土壤质量综合指数, 评价子午岭地区植被恢复过程对土壤质量的影响。结果表明: 土壤总孔隙度、平均重量直径(MWD)、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量、微生物总量构成土壤质量评价指标体系; 土壤质量综合指数随植被恢复年限的增加而增加; 植被自然恢复 1~140 a 间, 土壤质量综合指数变化范围为 0.155 9~0.850 9, 较裸露休闲地增加 4.2~27.5 倍; 根据土壤质量综合指数变化规律, 可将 140 a 植被恢复过程中的土壤质量演变过程分为 3 个阶段, 即植被恢复初期(1~20 a) 的土壤质量综合指数呈快速增长, 植被恢复中期(20~40 a) 的土壤质量综合指数呈波动性增长, 植被恢复后期(40~140 a) 的土壤质量综合指数呈稳定增长。植被演替过程中不同植被生活型土壤质量综合指数表现为乔木林地 > 灌木林地 > 草地。

**关键词** 土壤质量; 指标体系; 主成分分析; 土壤质量综合指数; 子午岭地区

## Evaluation of soil quality during vegetation restoration in the Ziwuling Area of Loess Plateau

L ÜChunhua<sup>1,2</sup>, Zheng Fenli<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A & F University; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau: 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract** Taking research sites located at sunny hillslopes of natural vegetation restoration with different age (1 - 140 a) in the Ziwuling Area of Loess Plateau as a case study, selecting sensitive indicators from 16 soil physical, chemical and biological attributes of topsoil (0 - 20 cm) through correlation analysis, the paper assessed soil quality index ( $I_{SQ}$ ) during vegetation restoration in the Ziwuling Area through statistic analysis method and principal component analysis. Results indicated that, during vegetation natural succession in the Ziwuling Area, soil total porosity, mean weight diameter (MWD), organic matter, available P, invertase activity, alkaline phosphatase activity, fungi, and microbial biomass were selected as soil quality assessment indicators. Soil quality index increased with vegetation restoration during over 140 years.  $I_{SQ}$  shifted from 0.155 9 to 0.850 9 during more than 140 years' natural vegetation succession, and  $I_{SQ}$  was 4.2 - 27.5 times greater than that on bare and fallow land. Based on  $I_{SQ}$  change trend, evolution process of  $I_{SQ}$  could be divided into 3 stages, that were,  $I_{SQ}$  increased rapidly at the beginning of vegetation restoration (1 - 20 a);  $I_{SQ}$  increased fluctuant in the mid-term of vegetation restoration (20 - 40 a);  $I_{SQ}$  increased steadily in the later period of vegetation restoration (40 - 140 a). For different vegetative types during vegetation restoration,  $I_{SQ}$

收稿日期: 2008-09-24 修回日期: 2009-02-26

项目名称: 中国科学院西部行动计划(二期)项目“水文过程响应及其模拟”(KZCX2- XB2- 05); 西北农林科技大学创新团队计划项目“土壤侵蚀及其治理环境效应评价”(01140202)

第一作者简介: 吕春花(1981—), 女, 博士研究生。主要研究方向: 生态修复与环境效应评价。E-mail: lvchunhua9308@yahoo.com.cn

†责任作者简介: 郑粉莉(1960—), 女, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀和生态修复。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

followed the order: forest land > shrub land > grassland.

**Key words** soil quality; indicator system; principal component analysis; soil quality index; Ziwuling Area

土壤是植物群落的主要环境因子之一,植物群落演替过程,也是植物与土壤相互影响和相互作用的过程<sup>[1]</sup>。子午岭地区经过 140 多年的植被恢复,已形成较大范围的次生森林景观,其中部分已经自然恢复演替到顶级群落阶段。植被恢复过程中,土壤质量的改善,促进了植被生长发育,进而促进植被演替进程,另一方面,植被演替又对土壤质量产生重要影响。土壤质量是土壤在一定生态系统内提供生命必需养分和生产生物物质的能力,容纳、降解、净化污染物质和维护生态平衡的能力,影响和促进植物、动物和人类生命安全和健康的能力之综合程度<sup>[2-3]</sup>,是土壤理化及生物属性及形成这些属性的一些重要过程的综合体。目前土壤质量的评价方法不尽相同<sup>[4-6]</sup>,对于土壤质量的评价多数都是针对数据集的建立<sup>[7-8]</sup>,主要评价方法有多变量指标克里格法(multiple variable indicator kriging, MVIK)、土壤质量动力学方法、土壤质量综合评分方法和土壤相对质量评价法<sup>[9]</sup>。

笔者以黄土高原子午岭地区为研究区,通过采集植被恢复不同年限下的土壤表层(0~20 cm)样品,测定 16 项土壤物理(田间持水量、>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数、平均重量直径(MWD)、总孔隙度、毛管孔隙度)、化学(有机质质量分数、全氮质量分数、速效磷质量分数)、生物学指标(蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、真菌数量、细菌数量、放线菌数量、微生物总量),采用相关分析筛选土壤质量评价指标,运用多元统计分析中的主成分分析法基础上的土壤质量综合指数法,对子午岭地区植被恢复过程中土壤质量演变进行评价,以期对黄土高原退耕还林和植被恢复最佳途径的选择及水土保持建设提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验区位于子午岭林区内的陕西省富县任家台林场,地跨 E 109°11.901 ~ 109°08.965, N 36°05.391 ~ 36°04.166。属梁状黄土丘陵沟壑区,海拔 920~1 683 m,相对高差 100~150 m。该区年均气温 9℃,年均降雨量 576.7 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降雨量的 70% 以上。该区林木郁闭度超过 0.7,主要树种有山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Be-*

*tula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、榆树(*Ulmus pumila*)和杜梨(*Pyrus betulaefolia*)等。林下灌草覆盖度超过 0.9,主要有绣线菊(*Spiraea*)、胡枝子(*Lespedeza*)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、山桃(*Prunus davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、四季青(*Folium Illicis Pupureae*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)等。该区土壤类型为灰色黄土正常新成土,无明显的淋溶层和淀积层<sup>[10-12]</sup>。

### 1.2 样地选择和取样

通过多次走访、资料查证和野外考证,选择确定海拔、坡向(半阳坡)、坡度相近而植被恢复年限不同的 8 块梁坡地为研究对象,并以同一坡位上的裸露地为对照。8 个采样地块植被恢复年限及其对应的植被群落为:植被恢复当年的植被群落为狗尾草+猪毛蒿群落(*Setaria viridis* + *Artemisia scoparia* community)、恢复 5 a 的为猪毛蒿+早熟禾群落(*Artemisia scoparia* + *Poa pratensis* L. community)、恢复 10 a 的为铁杆蒿+苦菜群落(*Artemisia sacrorum* + *Ixeris denticulate* community)、恢复 20 a 的为猪毛蒿+长芒草群落(*Artemisia scoparia* + *Stipa bungeana* community)、恢复 30 a 的为沙棘+赖草群落(*Hippophae rhamnoides* + *Leymus scalinus* community)、恢复 40 a 的为铁杆蒿+白羊草群落(*Artemisia sacrorum* + *Bothriochloa ischaemum* community)、恢复 50 a 的为白羊草+狼牙刺群落(*Bothriochloa ischaemum* + *Sophora viciifolia* community)、恢复 140 a 的为辽东栎群落(*Quercus liaotungensis* community)。每个样地从左到右分成 3 个条带,每个条带按 S 型多点采集 0~20 cm 土层土壤样品进行混合(即每块样地设 3 个重复),四分法获取测试样品。微生物测试样品用土壤鲜样,其他土壤样品经风干后,研磨后过 2、1 和 0.25 mm 筛,并分别装袋供分析使用。

### 1.3 分析方法

土壤密度用环刀法,土壤水稳性团聚体质量分数用湿筛法,土壤田间持水量用离心机法,有机质质量分数用重铬酸钾容量法,全氮质量分数用半微量开氏法,速效磷质量分数用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 比色法,土壤过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法,碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法,脲酶活性用苯酚-次氯酸钠比色法,蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法,土壤微生物数量测定用稀释平板涂抹法(细菌

用牛肉膏-蛋白胨培养基、真菌用马铃薯葡萄糖琼脂培养基、放线菌用高氏 1 号培养基)<sup>[13]</sup>。

利用 SAS 软件<sup>[14]</sup>对数据进行差异性检验及主成分分析,采用土壤质量综合指数法<sup>[9]</sup>来量化植被自然恢复过程中土壤质量演变情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤质量评价指标的选择

评价指标的选定是土壤质量评价的核心工作。出于实际应用的目的,一般只选择那些易度量、重现性好的指标<sup>[15]</sup>。曹志洪<sup>[2]</sup>提出土壤质量指标包括土壤有机质、速效钾、有效磷、pH 值、土层厚度、黏粒、密度、水稳性团聚体和微生物生物量等,并得出土壤质量指标隶属度值,进而进行土壤质量的评价。王效举等<sup>[16]</sup>根据红壤丘陵地区的自然特点,选择了土层厚度、土壤质地、坡度、土壤有机质、全 N、水解氮、速效磷、速效钾、全 P、全 K、阳离子交换量、pH 值共 12 个指标。张华等<sup>[17]</sup>和赵玉国等<sup>[18]</sup>对海南土壤

质量现状进行系统评价,包括总有机碳、土壤微生物生物量、速效 P、速效 K、水稳性团聚体含量、pH 值、CEC、密度、黏粒含量和土层深度 10 项指标。许明祥等<sup>[19]</sup>研究表明,黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价指标为有机质、渗透系数、抗冲性、CEC、蔗糖酶、团聚体平均重量直径、速效 P、微团聚体平均重量直径。这些评价指标涉及到土壤生物学性质的很少。近年来,生物学指标包括酶活性、微生物生物量,土壤呼吸等在土壤质量评价中越来越受到重视<sup>[3,20-21]</sup>。

笔者在参考黄土区已有的土壤质量评价指标的基础上,重点增加了表征土壤生物学特性的酶活性和土壤微生物量,共测定土壤物理、化学、微生物学指标 16 个,包括田间持水量、> 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数、MWD、总孔隙度、毛管孔隙度、有机质质量分数、全氮质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、真菌数量、细菌数量、放线菌数量、微生物总量。测定结果如表 1 所示。

表 1 植被恢复过程中土壤质量性状变化

Tab. 1 Change of soil quality indices during vegetation restoration

土壤质量指标	恢复年限/a								
	对照	1	5	10	20	30	40	50	140
田间持水量/ %	31.40 (1.27)	23.71 (0.70)	18.55 (0.22)	22.17 (0.29)	23.05 (0.51)	18.90 (1.36)	24.08 (0.97)	23.43 (1.00)	31.10 (1.01)
> 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数/ %	51.36 (5.45)	50.44 (1.97)	64.30 (5.33)	68.52 (1.72)	72.45 (2.32)	72.54 (8.91)	71.76 (6.15)	74.70 (5.95)	59.97 (3.18)
MWD/mm	2.69 (0.75)	2.19 (0.36)	3.09 (0.60)	3.46 (0.41)	4.86 (0.75)	3.91 (1.09)	4.79 (0.16)	4.92 (1.43)	2.76 (0.23)
土壤总孔隙度/ %	51.71 (0.37)	52.38 (1.33)	53.86 (2.95)	59.71 (2.31)	55.40 (1.73)	64.50 (8.60)	54.31 (5.54)	59.21 (2.50)	63.26 (4.48)
土壤毛管孔隙度/ %	40.63 (0.26)	48.45 (0.62)	44.72 (1.30)	48.92 (1.50)	49.27 (1.53)	48.46 (2.78)	45.43 (1.64)	50.98 (0.48)	55.52 (0.69)
有机质质量分数/(g kg <sup>-1</sup> )	6.25 (0.14)	7.80 (0.07)	9.60 (0.21)	17.10 (0.21)	16.50 (0.42)	23.20 (0.28)	10.70 (0.07)	14.80 (0.07)	40.00 (1.17)
全氮质量分数/(g kg <sup>-1</sup> )	0.54 (0.01)	0.59 (0.01)	0.69 (0.01)	1.10 (0.01)	1.14 (0.01)	1.50 (0.01)	0.81 (0.01)	1.00 (0.03)	2.16 (0.01)
速效磷质量分数/(g kg <sup>-1</sup> )	1.18 (0.12)	1.36 (0.10)	2.00 (0.28)	1.04 (0.30)	2.34 (0.35)	3.08 (0.40)	0.86 (0.28)	1.66 (0.10)	4.13 (0.14)
蔗糖酶活性/(mL kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	58.13 1.60	182.29 (0.00)	127.29 (1.05)	167.50 (1.05)	186.88 (3.13)	315.00 (7.19)	127.50 (3.19)	165.00 (2.09)	361.25 (0.60)
脲酶活性/(mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	64.77 (5.00)	94.22 (3.27)	90.94 (2.31)	166.20 (15.11)	221.82 (18.22)	250.30 (20.28)	161.80 (17.70)	152.95 (9.39)	219.33 (16.75)
碱性磷酸酶活性/(mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	47.68 (0.64)	64.23 (0.00)	58.50 (4.33)	93.50 (4.97)	91.59 (0.73)	141.96 (5.34)	83.55 (1.00)	91.42 (2.30)	158.36 (1.14)
过氧化氢酶活性/(mL g <sup>-1</sup> )	15.26 (0.12)	15.74 (0.20)	15.82 (0.03)	16.32 (0.21)	16.74 (0.15)	16.63 (0.29)	16.68 (0.19)	16.14 (0.27)	18.68 (0.03)

续表 1

土壤质量指标	恢复年限/a								
	对照	1	5	10	20	30	40	50	140
真菌数量/10 <sup>2</sup>	5.19 (1.24)	3.09 (0.79)	6.98 (1.39)	5.61 (0.74)	5.94 (0.46)	14.49 (2.91)	34.33 (0.62)	5.29 (0.49)	56.64 (18.09)
细菌数量/10 <sup>5</sup>	7.06 (0.38)	9.92 (0.79)	12.12 (0.23)	6.20 (1.07)	8.88 (1.13)	10.06 (1.24)	9.73 (1.05)	6.53 (0.64)	13.53 (1.24)
放线菌数量/10 <sup>5</sup>	1.78 (0.15)	3.12 (0.34)	2.77 (0.20)	2.42 (0.38)	2.79 (1.13)	2.83 (1.35)	2.60 (1.02)	2.95 (1.36)	3.23 (0.51)
微生物总量/10 <sup>5</sup>	8.84 (0.27)	13.03 (0.58)	14.89 (0.37)	8.62 (0.75)	11.67 (1.86)	12.89 (1.49)	12.33 (1.00)	9.48 (0.93)	16.76 (1.79)

注：括号中数值为标准方差。

土壤质量各指标之间可能存在一定相关性,相关性分析可以解释土壤属性各指标变量之间的牵连程度以及指标之间的协调效应,相关系数的大小可以反映出变量之间所包含信息的重叠程度,这是筛选土壤质量评价指标时的参考依据。土壤质量各指标间的相关分析如表 2 所示,土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体质量分数与土壤平均重量直径 MWD 呈极显著相关(0.919 5),土壤总孔隙度与土壤有机质、全氮、速效磷质量分数及土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性都存在显著相关,因此选择相对独立且能全面表征土壤团聚体特征的 MWD 和表征土壤孔性特征的土壤总孔隙度作为物理评价指标。土壤全氮、速效

磷质量分数与有机质质量分数有密切关系 (< 0.01),因此,三者间选择表征土壤肥力基本性质的有机质质量分数和速效磷质量分数作为化学评价指标。土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性与土壤养分均呈现显著线性相关关系,且蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性之间也存在显著相关关系,结合各类酶活性在植被恢复过程中变化(表 1),选择随植被恢复年限增加上升相对稳定的蔗糖酶和碱性磷酸酶活性作为生物学评价指标。真菌与土壤有机质、全氮质量分数呈显著相关,细菌和微生物总量与土壤效磷质量分数显著相关,真菌、细菌、放线菌数量与微生物总量之间相关系数分别为 0.613 5、0.981 0、

表 2 土壤质量指标相关矩阵

Tab. 2 Correlation matrix (r-values) between soil quality factors

	田间持水量	>0.25 mm 水稳性团聚体	MWD	总孔隙度	毛管孔隙度	有机质	全氮	速效磷	蔗糖酶	脲酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	真菌	细菌	放线菌	微生物总量
田间持水量	1.000 0	-0.576 4	-0.344 9	-0.119 5	0.086 7	0.123 2	0.087 8	0.024 0	-0.086 2	-0.247 0	-0.240 9	0.476 5	0.391 5	-0.047 5	-0.246 6	-0.118 8
>0.25 mm 水稳性团聚体		1.000 0	0.919 5**	0.443 3	0.179 9	0.216 8	0.291 8	0.070 7	0.173 6	0.612 0	0.581 7	-0.128 2	0.020 5	-0.235 2	0.207 3	-0.168 9
MWD			1.000 0	0.195 9	0.088 9	0.031 7	0.109 7	-0.086 8	-0.050 2	0.430 6	0.370 1	-0.152 2	0.006 2	-0.352 6	0.113 9	-0.290 6
总孔隙度				1.000 0	0.476 3	0.854 5**	0.888 7**	0.699 3*	0.814 5**	0.852 8**	0.924 7**	0.346 3	0.400 6	0.161 9	0.246 7	0.153 2
毛管孔隙度					1.000 0	0.720 2*	0.658 3	0.601 5	0.642 6	0.492 2**	0.423 5	0.717 6*	0.529 7	0.376 9	0.802 8**	0.478 5
有机质						1.000 0	0.991 5**	0.876 9**	0.905 2**	0.806 7**	0.812 4**	0.764 8*	0.727 7*	0.523 2	0.452 8	0.508 9
全氮							1.000 0	0.875 7**	0.895 9**	0.860 0**	0.861 0**	0.706 5*	0.687 1*	0.469 3	0.384 1	0.444 8
速效磷								1.000 0	0.865 8**	0.714 5*	0.673 5*	0.617 5	0.543 5	0.688 1*	0.426 5	0.663 3
蔗糖酶									1.000 0	0.819 5**	0.849 7**	0.575 5	0.580 5	0.597 1	0.583 7	0.592 5
脲酶										1.000 0	0.953 4**	0.392 2	0.394 9	0.245 6	0.341 4	0.229 4
碱性磷酸酶											1.000 0	0.330 9	0.453 1	0.244 1	0.339 1	0.230 3
过氧化氢酶												1.000 0	0.864 5**	0.602 6	0.432 1	0.583 4
真菌													1.000 0	0.633 2	0.431 7	0.613 5
细菌														1.000 0	0.522 5	0.981 0**
放线菌															1.000 0	0.658 1
微生物总量																1.000 0

注：\* 为 0.01 水平差异显著, \* 为 0.05 水平差异显著。

0.658 1,说明这 3 类群微生物的数量与土壤微生物量相关性有一定顺序,其中,细菌关系最大,放线菌次之,真菌最小。由此也说明真菌在土壤中数量稳定,且其变动对土壤微生物量的变化影响较小;因此,选择数量稳定的真菌和表征微生物数量性质的微生物总量作为土壤生物学指标。

综上所述,从 16 个土壤属性指标中选择了 8 个指标构成评价土壤质量的指标体系,包括总孔隙度、MWD、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量、微生物总量。

## 2.2 土壤质量综合指数计算

2.2.1 土壤质量评价指标隶属度的计算 土壤质量综合指数是土壤各指标因子的综合和集成。为避

免计算结果受变量量纲的影响,保证其客观性和科学性,在进行土壤综合指数计算之前必须对原始数据矩阵进行标准化处理。由于各土壤质量因子变化具有连续性质,故各评价指标采用连续的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合。对于各项质量因子采用升型分布函数,计算公式<sup>[22]</sup>为

$$Q(X_i) = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (1)$$

式中: $Q(X_i)$  为各土壤因子的隶属度值; $X_{ij}$  为各因子值; $X_{imax}$  和  $X_{imin}$  分别为第  $i$  项因子中的最大值和最小值。计算结果见表 3。

土壤质量各因子的隶属度值取值范围在 0 ~ 1

表 3 植被恢复过程中土壤质量因子及其隶属度值

Tab.3 Values of soil quality factors and their membership function values during vegetation restoration

恢复年限/a		土壤质量因子							
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
对照	A	51.710	2.690	6.3	1.180	58.130	47.680	5.189	8.836
	B	0.000	0.183	0.000	0.058	0.000	0.000	0.039	0.027
1	A	52.383	2.188	7.8	1.360	182.290	64.230	3.095	13.034
	B	0.053	0.000	0.046	0.090	0.410	0.150	0.000	0.542
5	A	53.858	3.091	9.6	2.000	127.29	58.500	6.982	14.889
	B	0.168	0.330	0.099	0.206	0.228	0.098	0.073	0.770
10	A	59.713	3.455	17.1	1.040	167.500	93.500	5.611	8.623
	B	0.626	0.464	0.321	0.032	0.361	0.414	0.047	0.000
20	A	55.398	4.863	16.5	2.340	186.880	91.590	5.940	11.667
	B	0.288	0.979	0.304	0.267	0.425	0.397	0.053	0.374
30	A	64.504	3.911	23.2	3.080	315.00	141.960	14.492	12.888
	B	1.000	0.630	0.502	0.401	0.847	0.852	0.213	0.524
40	A	54.306	4.794	10.7	0.860	127.500	83.550	34.331	12.334
	B	0.203	0.954	0.132	0.000	0.229	0.324	0.583	0.456
50	A	59.206	4.921	14.8	1.660	165.00	91.420	5.292	9.481
	B	0.586	1.000	0.253	0.144	0.353	0.395	0.041	0.106
140	A	63.260	2.760	40.0	6.400	361.250	158.360	56.642	16.763
	B	0.903	0.209	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

注:A:各土壤质量因子的测定值,单位同表 1;B:各土壤质量因子的隶属度值。 $X_1 \sim X_8$  分别为总孔隙度、MWD、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量、微生物总量,下同。

之间,在同等条件下隶属度值越大,表明该土壤指标值越好。0 不意味着被测样地的某项指标不能测量出,只是表示在该指标测量值相对其他样地为最小。由表 3 可见:对照裸露地土壤总孔隙度、有机质质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性隶属度值均为 0。植被恢复 140 a 乔木林地,除了土壤总孔隙度和

MWD 的隶属度值为 0.903 和 0.209,其他土壤质量因子的隶属度值均为 1,与这些土壤质量指标值在林地均最高相一致。随植被恢复年限的增加,土壤各项指标的隶属度值均呈显著上升趋势,表明开垦地一旦退耕,植被自然恢复后,土壤的物理、化学、生物学性质得到全面改善,在黄土高原进行生态修复

是减少土壤养分流失,保持水土的有力措施。

2.2.2 主成分分析 由于指标过多,且指标间经常具备一定的相关性,因而所得到的统计数据反映的信息在一定程度上有重叠<sup>[14]</sup>,可采用主成分分析的方法将原始指标经过线性组合得到较少的综合指标<sup>[23-24]</sup>。土壤质量各个因子的状况与重要性存在差异,通常用权重系数来表示各个因子的重要性程度。权重系数的确定有许多的方法,包括经验法、专家法、数学统计或模型等。本研究运用 SAS 软件计算质量因子主成分负荷量、方差贡献率和累积方差贡献率,确定各因子在土壤质量中的作用大小,从而确定它们的权重。

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n (C_i) \quad (2)$$

式中:  $W_i$  为各土壤质量因子的权重;  $C_i$  是第  $i$  个土壤质量因子的因子负荷量。

子午岭地区植被恢复过程中土壤质量评价指标主成分分析结果如表 4,可以看出,第 1 主成分的方差贡献率达 67.07%,第 1 和第 2 主成分的方差贡献率达 84.47%,第 1、第 2 和第 3 主成分的方差贡献率达 92.95%。根据主成分分析原理,综合得分等于各主成分得分之和,当累积方差贡献率大于 85% 时,即可用来反映系统的变异信息,可见用第 1、第 2 和第 3 个主成分即可代表系统内的变异状况。由主成分的组成因素可知,3 个主成分综合了土壤总孔隙度、MWD、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量、微生物总量的变异信息。

表 4 主成分分析的负荷量、权重、特征根与方差贡献率

Tab. 4 Capacity, weight, eigenvalues and percentages of PCA

土壤质量因子	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
$X_1$	0.356 2	0.134 6	0.376 8	0.167 1	- 0.349 3	0.153 3
$X_2$	- 0.020 3	0.007 7	0.718 2	0.318 5	0.607 9	0.266 7
$X_3$	0.420 2	0.158 8	0.066 8	0.029 6	- 0.075 8	0.033 2
$X_4$	0.402 9	0.152 3	- 0.184 7	0.081 9	- 0.005 2	0.002 3
$X_5$	0.410 4	0.155 1	0.044 8	0.019 9	- 0.212 3	0.093 2
$X_6$	0.410 6	0.155 2	0.235 8	0.104 6	- 0.093 5	0.041 0
$X_7$	0.337 5	0.127 5	- 0.157 0	0.069 6	0.544 3	0.238 9
$X_8$	0.288 0	0.108 8	- 0.470 6	0.208 7	0.390 6	0.171 4
特征根	5.365 3		1.392 4		0.678 6	
方差贡献率/ %	67.066 2		17.405 2		8.482 7	
累计方差贡献率/ %	67.066 2		84.471 4		92.954 1	

由规格化特征向量得出土壤质量评价系统的第 1、第 2、第 3 主成分方程:

$$F_1 = 0.356 2 X_1 - 0.020 3 X_2 + 0.420 2 X_3 + 0.402 9 X_4 + 0.410 4 X_5 + 0.410 6 X_6 + 0.337 5 X_7 + 0.288 0 X_8$$

$$F_2 = 0.376 8 X_1 + 0.718 2 X_2 + 0.066 8 X_3 - 0.184 7 X_4 + 0.044 8 X_5 + 0.235 8 X_6 - 0.157 0 X_7 - 0.470 6 X_8$$

$$F_3 = - 0.349 3 X_1 + 0.607 9 X_2 - 0.075 8 X_3 - 0.005 2 X_4 - 0.212 3 X_5 - 0.093 5 X_6 + 0.544 3 X_7 + 0.390 6 X_8$$

综合得分值

$$F = 0.671 F_1 + 0.174 F_2 + 0.085 F_3$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$  及  $F_3$  分别为第 1、第 2 及第 3 主成分。第 1 主成分方差贡献率表明,子午岭地区植被自然恢复过程中,土壤总孔隙度、MWD、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量、微生物总量等因子构成了土壤质量的主驱动因子。

2.2.3 土壤质量综合指数的计算<sup>[25]</sup>与分析 根据加乘法则,对各个土壤质量的指标值采用乘法进行合成,计算植被恢复不同年限土壤质量的综合指数  $I_{SQ}$  的计算公式为

$$I_{SQ} = \prod_j^m k_j \left( \prod_{i=1}^n W_i Q(X_i) \right) \quad (3)$$

式中:  $n$  为评价指标的个数,取 8;  $m$  为所选主成分个数,取 3;  $k_j$  为第  $j$  个主成分的方差贡献率。

土壤质量是揭示不同土地利用方式下土壤动态变化最敏感的指标,是土壤综合特性的反映<sup>[25]</sup>。根据式(3)对子午岭地区植被自然恢复过程中土壤质量综合指数进行运算分析,利用表层土壤质量综合指数变化来定量分析该区植被自然恢复 140 a 以来土壤质量的变化趋势,结果如图 1 所示,可知,随着植被恢复年限的增加,土壤综合质量指数总体呈现上升趋势,其中  $R=0.8730$ ,说明土壤质量综合指数和恢复年限显著相关,即植被演替使土壤质量逐渐改善。裸露休闲地的土壤质量综合指数仅为 0.0299,而植被自然恢复 1~140 a,土壤质量综合指数变幅为 0.1559~0.8509,较裸露休闲地增加了 4.2~27.5 倍。这说明恢复植被在改良土壤理化及生物学性状、提高土地生产力、保水固土等方面具有重要的作用,也说明了退耕还林(草)的合理性。

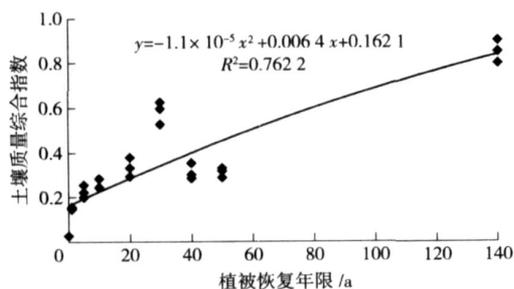


图 1 植被恢复过程中土壤质量综合指数变化

Fig. 1 Evolution of  $I_{SQ}$  during vegetation restoration

由图 1 还可看出:子午岭地区植被恢复 20 a 内,土壤质量综合指数稳定上升,此阶段植被群落为草地,草本植物为土壤积累有机质,土壤孔隙情况得到改善;植被恢复 20~30 a 土壤质量综合指数上升幅度增大,这是由于此阶段,植被自然演替完成由草本群落到灌木群落正向演替的过程,枯落物增多,促进土壤有机质增加;植被恢复 30~40 a,土壤质量综合指数略呈下降趋势,这是由于灌木群落进入快速生长期,需要从土壤中吸收大量养分;植被恢复 40 a 后,植被群落结构趋于稳定,土壤质量综合指数逐渐上升;植被恢复 140 a 乔木林地,土壤质量综合指数达到最大值,主要与乔木林凋落物数量多,地表枯枝落叶层较厚,土壤生化强度高,土壤有机物质分解合成作用较强烈有关。土壤质量综合指数在植被演替过程中不同生活型表现为:乔木林地 > 灌木林地 > 草地。

### 3 结论

1) 通过相关性分析从 16 项土壤属性指标中筛

选出总孔隙度、MWD、有机质质量分数、速效磷质量分数、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、真菌数量和微生物总量 8 个因子作为子午岭地区植被恢复过程中土壤质量评价的指标体系。

2) 运用主成分分析计算子午岭地区植被自然恢复的 140 多年的土壤质量综合指数。在植被恢复 1~140 a 间,土壤质量综合指数变化于 0.1559~0.8509 之间,较裸露休闲地增加了 4.2~27.5 倍,表明植被恢复明显改善了土壤质量。根据土壤质量综合指数变化规律,可将土壤质量演变过程分为 3 个阶段,即植被恢复初期(1~20 a)的土壤质量综合指数快速增长,植被恢复中期(20~40 a)的土壤质量综合指数表现为波动性增长,植被恢复后期(40~140 a),土壤质量综合指数稳定增加。

3) 土壤质量评价方法很多,本研究选择主成分分析方法基础上的土壤质量综合指数法主要是因为其简便,易于掌握及理解,本方法与其他方法的比较研究也是以后研究的内容之一。由于受条件限制,在 50~140 a 之间未能找到合适的样地,因此,需加强灌木—乔木演替过程中土壤质量变化趋势的研究。

### 4 参考文献

- [1] Dabis M B, West D C, Shugart H H, et al. Forest succession concept and applications. New York: Springer-Verlag, 1981:185-211
- [2] 曹志洪. 解释土壤质量演变规律确保土壤资源持续利用. 世界科技研究与发展, 2001, 23(3):28-32
- [3] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境. 土壤质量的定义及评价方法. 土壤, 1997(3):113-120
- [4] Breure A M, Mulder C, Rombke J, et al. Ecological classification and assessment concepts in soil protection. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 62:211-229
- [5] Shukla M K, Lal R, Ebinger M. Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil & Tillage Research, 2006, 87:194-204
- [6] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leiros M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37:877-887
- [7] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集. 土壤学报, 2008, 45(1):16-25
- [8] Doran J W, Parkin T B, Jones A J. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. Methods for Assessing Soil Quality. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1996:25-37

(下转第29页)

- [3] 张北赢,徐学选,李贵玉,等.土壤水分基础理论及其应用研究进展.中国水土保持科学,2007,5(2):122-129
- [4] 陈洪松,邵明安,王克林,等.黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征.应用生态学报,2005,16(10):1853-1857
- [5] 姜娜,邵明安,雷廷武,等.水蚀风蚀交错带典型土地利用方式土壤水分变化特征.北京林业大学学报,2007,29(6):134-137
- [6] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子.应用生态学报,2001,12(5):715-720
- [7] 杨文治,邵明安,彭新德,等.黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系.中国科学D辑,2007,30(5):1-5
- [8] 徐学选,张北赢,踞桐军.黄土丘陵区降雨、径流、土壤水分的时空分布与利用对策.生态环境,2005,14(6):890-893
- [9] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨.生态环境,2003,12(1):52-55
- [10] 陈文亮.组合侧喷式野外人工降雨装置.水土保持通报,1984,4(5):43-47
- [11] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析.应用生态学报,2003,14(4):515-519
- [12] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征.水土保持学报,2007,21(5):106-109
- [13] 王小燕,陈洪松,王克林,等.不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究.水土保持学报,2006,20(2):110-113
- [14] 段建军.黄土高原地区土壤干层的分布状况与时空动态研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006
- [15] 孙中峰,张学培.晋西黄土区坡面尺度土壤水分分布规律研究.水土保持通报,2006,26(5):27-30
- [16] 李笑吟,毕华兴,张志,等.晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响.北京林业大学学报,2006,28(4):51-56

(责任编辑:宋如华)

(上接第18页)

- [9] 郑昭佩,刘作新.土壤质量及其评价.应用生态学报,2003,14(1):131-134
- [10] 郑粉莉,张成娥.加速侵蚀对土壤腐殖酸动态变化的影响.生态学报,1999,19(2):194-199
- [11] 张平仓,郑粉莉.子午岭地区自然区域特征及其与土壤侵蚀的关系.西北水土保持研究所集刊,1993(17):11-16
- [12] 郑粉莉,唐克丽,王文龙,等.子午岭林区和开垦地土壤侵蚀特征研究.西北水土保持研究所集刊,1993(17):29-36
- [13] 南京大学.土壤农化分析.北京:农业出版社,1986
- [14] 袁志发,周静芋.多元统计分析.北京:科学技术出版社,2002:188-201
- [15] 路鹏,苏以荣,牛铮,等.土壤质量评价指标及其时空变异.中国生态农业学报,2007,15(4):190-194
- [16] 王效举,龚子同.红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测.土壤学报,1998,35(1):135-139
- [17] 张华,张甘霖,漆志平,等.热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价.土壤学报,2003,40(2):186-193
- [18] 赵玉国,张甘霖,张华,等.海南岛土壤质量系统评价与区域特征探析.中国农业生态学报,2004,12(3):13-15
- [19] 许明祥,刘国彬,赵允格.黄土丘陵区土壤质量评价指标研究.应用生态学报,2005,16(10):1843-1848
- [20] John J B, Moorman T B, Kaarlen D L, et al. Identification of regional soil quality factors and indicators. Central and southern high plains. Soil Sci Soc Am J, 2000,64(6):2115-2124
- [21] Stenberg B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. Acta Agriculture Scandinavica, Sect. B-Plant Soil Science, 1999, 49(1):1-24
- [22] 张庆费,宋永昌,由文辉.浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系.生态学报,1999,2(2):174-179
- [23] 唐启义,冯明光.实用统计分析及其DPS数据处理系统.北京:科学出版社,2002:20-25
- [24] 李月芬,汤洁,李艳梅.用主成分分析和灰关联度分析评价草原土壤质量.世界地质,2004(2):169-174
- [25] 胡金明,刘兴土.三江平原土壤质量变化评价与分析.地理科学,1999,19(5):417-421

(责任编辑:程云)