

黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价

许明祥¹, 刘国彬¹, 赵允格²

(1 中国科学院、水利部水土保持研究所, 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100;

2 中国科学院水利部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)

摘要: 通过建立侵蚀土壤质量单因素评价模型和综合评价模型, 选出了黄土丘陵区适宜的侵蚀土壤质量评价方法, 定量评价了该区土地利用方式对土壤质量的影响。结果表明, 采用加权综合法对土壤质量进行综合评价能够较好地反映土壤质量的实际情况, 敏感地反映土地利用方式变化对土壤质量的影响。应用因子分析法所筛选的 8 项土壤质量简化评价指标能够很好地反映 29 项综合评价指标的信息, 评价结果具有较高的代表性。拟定了黄土丘陵区侵蚀土壤质量分级标准, 将研究区土壤质量分为 5 级。黄土丘陵区 10 种土地利用类型间土壤质量差异显著, 以天然乔木林地土壤质量最佳, 属 1 级; 其次是天然灌木林地和大棚菜地, 土壤质量属 2 级; 天然草地土壤质量属于 3 级, 人工乔灌林地土壤质量接近 3 级; 人工草地、撂荒地、农地和果园土壤质量属于 4 级。

关键词: 土壤质量; 评价模型; 土壤质量分级; 黄土丘陵区

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)03-0285-09

Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau

XU Ming-xiang¹, LIU Guo-bin¹, ZHAO Yun-ge²

(1 Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Northwest Univ. of Agric. and forest, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Through establishing single factor and integrated assessment models, suitable assessment method for erosion soil quality on hilly Loess Plateau was selected. Quantitative assessments of soil qualities in different land utilization types was also performed in this paper. The results showed that soil quality evaluation with weighted integrated method could preferably reflect the actual situation of assessed soils and effects the variation of land utilization on soil quality sensitively. The 8 simple soil quality indicators screened out by factor analysis reflected the information of 29 soil integrate assessment indicates well and results of assessment be of high representative. Furthermore, the criteria of classification for erosion soil quality were studied out. Soil quality of research area was classified into 5 grades. The research results also indicated that soil quality on the hilly Loess plateau was significantly different due to different land utilization types. Soil quality in natural forestland was the best and was classified into should belong to grade 1. Soil quality in natural shrub land and green house was classified into grade 2. The next one was natural grassland and its soil quality grade was 3. Soil quality in planted woodland and shrub land was close to grade 3. Planted grassland, revegetated grassland, cropland and orchard had a soil quality of grade 4.

Key words: soil quality; soil quality assessment models; soil quality classification; hilly Loess Plateau

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并展

开大量研究。国外在土壤质量指标的表征理论与方法^[1-4]、土壤质量保持与定向培育理论^[5]、耕作管理措施对土壤质量^[6], 尤其是土壤生物特性的影响方

收稿日期: 2004-03-11 修改稿收到日期: 2004-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40301028; 40401026); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目; 中国科学院知识创新项目(KZCX1-06)资助。

作者简介: 许明祥(1972—), 男(汉族), 陕西吴旗人, 助研, 博士, 主要从事土壤质量演变及流域生态系统健康诊断研究。

面取得较大进展。国内学者就土壤质量指标体系、评价方法、土壤质量评价的空间尺度转化、土地利用及耕作管理措施对土壤质量影响等方面进行较多的研究^[7-20],但仍存在一些不足,如:我国在该领域的系统研究才刚刚起步,有关土壤质量评价方法、指标体系及指标阈值尚待完善;注重土壤理化指标,而对生物指标研究不够;研究重点集中在红壤、潮土、黑土和水稻土上^[17]。虽然就黄土高原侵蚀土壤质量和健康变化的原因和机理也进行了较深入的研究^[10-14],如人为加速侵蚀导致的土壤质量退化(反演)^[10-11]、耕作导致的侵蚀及土壤再分布对土壤质量的影响等方面^[12],但对生态恢复过程中土壤质量的改善(正演)、植被恢复重建与土壤质量演变之间的相互作用研究较少^[13-14],尤其在侵蚀土壤质量综合评价指标及评价方法的确定方面研究不够。

在土壤质量定量评价中经常使用的数学方法有评分法、分等定级法^[17]、综合指数法^[17-18]、模糊评判法^[9,16,21]、聚类分析法^[15]以及地统计学方法^[17]。本研究在综合分析以上各种方法优缺点的基础上,从实用性的角度出发,应用综合指数法,对研究区土壤质量进行综合评价。目的在于选择适宜的侵蚀土壤质量评价方法,建立侵蚀土壤质量评价模型和评价不同土地利用方式对土壤质量的影响以及拟定黄土丘陵区侵蚀土壤质量分级标准等,为正确认识该区侵蚀土壤质量现状以及土地利用方式对土壤质量的影响,定量评估生态环境治理效果,进而为制定科学的土壤质量保育方案提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究在陕西安塞县(东经 108°51'44"~109°26'18",北纬 36°30'45"~37°19'31")的纸坊沟、县南沟、北宋塔(高桥乡)和桥庄村陀山(楼坪乡)以及延安的燕儿沟进行。该区属典型的黄土丘陵沟壑区,气候区划上属暖温带半干旱季风气候。平均海拔 1200m,相对高差 100~300m,年均气温 8.8℃,年均降水量 505.3mm,无霜期 157d。地带性土壤为黑垆土,由于严重的水土流失,黑垆土损失殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润锥形土)为主。

1.2 样品采集及测定

于 2001 年 8 月至 9 月在研究区内选取不同土地利用方式(天然乔木林、天然灌木林、人工乔木林、人工灌木林、天然草地、人工草地、撂荒地、果园、农地和大棚菜地)及不同利用年限的样地 208 个,在取

样点周围随机选择 5 个点,用土钻取其 0—20cm 土壤混合样。风干,剔除土样中的根系、石块等杂物,测定 32 项土壤理、化、生物属性。其中化学指标包括,全氮、全磷、全钾、有机质、活性有机碳(高锰酸钾氧化法)^[22-23]、碱解氮、速效磷、速效钾、CaCO₃、pH、CEC、C/N;物理指标包括砂粒、物理性粘粒、粘粒、微团聚体、水稳性团聚体(改进的 Yoder 法)^[24]、总孔隙度、毛管孔隙度、容重、比重、稳定入渗系数(K₁₀)、抗冲性(原状土冲刷法)^[14];并计算出团聚体平均重量直径(MWD)^[27]、微团聚体平均重量直径(MicMWD)(微团聚体粒级分 0.25~0.05mm、0.05~0.02mm、0.02~0.002mm 和 <0.002mm 四个等级, MicMWD 计算方法与 MWD 相同)及微团聚体结构系数[结构系数=(1- <0.002mm 微团聚体含量/ <0.002mm 机械分析值)×100%]^[15]。生物指标包括微生物碳和氮(氯仿熏蒸直接提取法)^[25]、磷酸酶(比色法)、蔗糖酶(Na₂S₂O₃ 滴定法)、脲酶(靛酚比色法)、呼吸强度(碱解吸收滴定法)^[26]。除标注参考文献的土壤性质外,其余均按照常规方法测定^[28]。

2 结果与分析

2.1 黄土丘陵区侵蚀土壤质量单因素评价模型

对土壤质量的评价首先要对各评价因素的优劣状况进行评价。由于各评价因素在优劣之间是渐变的,对土壤功能的影响也是渐变的,并在中间过渡中呈现亦次亦彼性,即对各评价因素的评价具有模糊性。因此,本研究借助模糊数学原理,建立土壤性质与土壤功能(生产力和抗侵蚀能力)间的隶属函数^[9,16,21]。以研究区天然乔木林地土壤性质为理想值,结合区域特征及前人研究结果,确定各土壤性质的阈值,从而建立黄土丘陵区侵蚀土壤单因素评价模型,并实现对各土壤性质的量纲规一化。

2.1.1 S 型隶属函数 土壤性质与土壤功能效应曲线呈“S”型,即在一定范围内评价因素指标值与土壤功能(如生产力)成正相关,而低于或高于此范围评价因素指标值的变化对土壤功能的影响很小。土壤全氮、全磷、有机质、活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物碳、微生物氮、磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、呼吸强度、抗冲性、渗透系数、阳离子代换量(CEC)、水稳性团聚体、团聚体平均重量直径(MWD)、微团聚体平均重量直径(MicMWD)、结构系数、微团聚体总量、总孔隙度和毛管孔隙度等属于此类。在建立这些土壤性质的隶属函数时,可将“S”型曲线近似成升半梯形分布(图 1)。其隶属函数为:

表1 研究样地的基本情况

Table 1 Characteristics of the studied sites

样地数 Samples	利用方式 Landuse	坡度(°) Gradient	坡位 Position	坡向 Aspect	地形 Relief	植被 Vegetation
4	大棚菜 GH				FP	
14	人工灌木 PS	14~34	U3, M9, L2	L1, S5, SL4, SS4	GS1, HS13	柠条 Caragana
9	果园 OC	20~32	U3, M3, L3	L2, SS1	GS2, HS3, TR4	苹果 Apple
46	撂荒地 WL	10~36	U14, M24, L8	L13, S11, SL12, SS10	GS4, HS39, TR3	黄花蒿 Sweet wormwood, 茵陈蒿 Oriental wormwood, 长芒草 Stipa bungeana Trin, 铁杆蒿 Tripoli sater,
28	人工乔木 PW	15~35	U2, M2	L4, S4, SL10, SS10	HS15, GS13	刺槐 Robinia
73	农地 CL	3~30	U6, L5, M62	L7, S19, SL20, SS27	HS45, TR21, FP7	谷子 Millet, 玉米 Maize, 荞麦 Buckwheat
13	人工草地 PG	7~34	U7, M6	L1, S1, SL9, SS2	HS12, TR1	草木樨 Daghestan sweetclover, 苜蓿 Alfalfa
22	天然草地 NG	12~40	U6, M10, L6	SL8, SS7, S4, L3	GS	铁杆蒿 Tripoli sater, 长芒草 Stipa bungeana Trin
4	天然灌木 NS	25~27	L	S3, SS1	HS2, GS2	水栒子 Cotoneaster acutifolius turcz., 黄刺玫 Rosa xanthina Lindl.
4	天然乔木 NW	15~35	U3, L1	S2, SL2	GS2, HS2	辽东栎 Vate oak, 白桦 Birch

注:U、M、L分别表示上、中、下坡位;FP、GS、HS、TR分别表示川地、梁峁坡、沟坡和梯田;坡向一栏中L、S、SL、SS分别表示阳坡、阴坡、半阳坡、半阴坡;坡度、坡向、地形中的数字代表样地个数,下同。

Note: GH—green house, PS—planted shrub land, OC—orchard, WL—waste land, PW—planted woodland, CL—cropland, PG—planted grassland, NG—natural grassland, NS—natural shrub land, NW—natural woodland; U、M、L means upper, middle and lower position; FP、GS、HS、TR means flood plain, gully slope, hillside, and terrace. L, S, SL, SS in the column of aspect means light, shade, semi-light and semi-shade, respectively. The numbers in the description of position, aspect and relief is the number of studied site, same as follows.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases}$$

式中, $\mu(x)$ 为隶属函数, x 为评价因素的实际指标值, a 、 b 分别表示指标阈值的下限和上限。

就本研究而言,以上各评价因素的隶属函数可简化为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \geq x_0 \\ \frac{x}{x_0} & x < x_0 \end{cases}$$

式中, x_0 为评价因素的上临界值(以研究区天然乔木林地土壤属性值作为上临界值,见表2)。

2.1.2 反S型隶属函数 土壤性质与土壤功能效应曲线呈反“S”型,即在一定范围内评价因素指标值与土壤功能(如生产力)成负相关,而低于或高于此范围评价因素指标值的变化对土壤功能的影响很小。土壤碳酸钙含量属于此类。在建立隶属函数时,可将反“S”型曲线近似成降半梯形分布(图2),其隶属函数为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a > x > b \\ 0 & x \geq a \end{cases}$$

式中, $\mu(x)$ 为隶属函数, x 为评价因素的实际指标值, a 、 b 分别表示指标阈值的上限和下限。

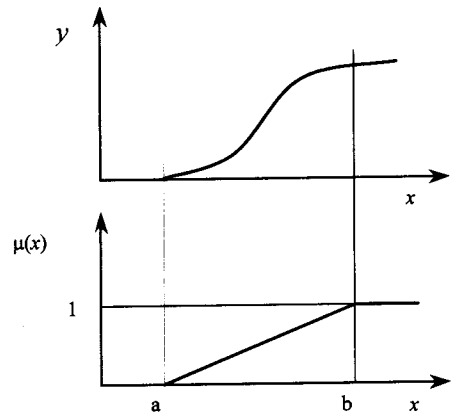


图1 “S”型曲线和升半梯形分布

Fig.1 Distribution of “S” curve and ascending half trapezoid

表 2 S型隶属函数中评价因素的上临界值

Table 2 Critical value of evaluation factors in membership function of "S" model

全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)	有机质 OM (g/kg)	LOC (g/kg)	碱解氮 AN (g/kg)	速效磷 AP (g/kg)	速效钾 AK (g/kg)	阳离子交换量 CEC(cmol/kg)
2.0	0.7	41.5	5.5	158.0	4.5	201.7	11.6
结构系数 SC	微团聚体总量 TMA (%)	MicMWD (mm)	水稳性团聚体 WSA (%)	MWD (mm)	毛管孔隙 CP (%)	总孔隙 TP (%)	K ₁₀
85.6	95.8	4.5	79.6	3.1	56.8	62.5	5.7
抗冲性 AS [L/(min·g)]	微生物碳 MC (mg/kg)	微生物氮 MN (mg/kg)	磷酸酶 Phosphatase (Phenol mg/g)	过氧化氢酶 Catalase (0.1mol/L KMnO ₄ mL/g)	蔗糖酶 Invertase [0.1mol/L Na ₂ S ₂ O ₃ mL/(kg·24h)]	脲酶 Urease (NH ₃ ⁻ -N μg/kg·24h)	呼吸强度 RI [mg/(kg·24h)]
21.7	256.2	54.3	6.8	8.6	6.4	5.2	1.0

注(Note): LOC—活性有机碳 Labile organic carbon, SC—结构系数 Structure coefficient, TMA—微团聚体总量 Total micro-aggregate, MicMWD—微团聚体重量直径 Mean weight diameter of microaggregate, WSA—水稳性团聚体 Sater stable aggregate, MWD—团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of aggregate, CP—毛管孔隙 Capillary porosity, TP—总孔隙 Total porosity, K₁₀—稳定入渗系数 Coefficient of infiltration at 10℃, AS—抗冲性 Anti-scourability, MC—微生物量碳 Micro biomass carbon, MN—微生物量氮 Micro biomass nitrogen, RI—呼吸强度 Respiration intensity, 下同 Same as follows.

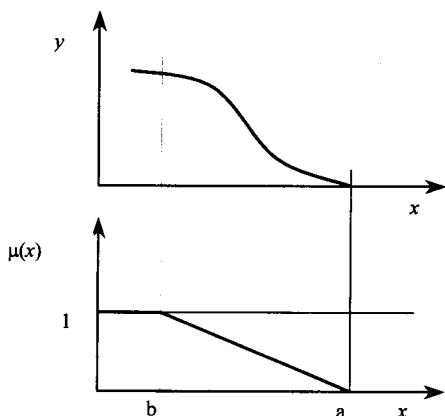


图 2 反“S”型曲线和降半梯形分布

Fig.2 Distribution of reverse "S" curve and descending half trapezoid

本研究中 a、b 分别取测定样点中碳酸钙含量最大值(155 g/kg)和天然乔木林地土壤碳酸钙含量(75 g/kg)。

2.1.3 抛物线型隶属函数 土壤性质与土壤功能效应曲线呈抛物线型,即评价因素指标值对土壤功能(如生产力)有一个最佳适宜范围,超过此范围,随着偏离程度的增大,对土壤功能的影响越不利,直达某一值时土壤丧失其功能。pH、容重和质地属于此类。在建立隶属函数时,可将抛物线型曲线近似成梯形分布(图 3),其隶属函数为:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & b_2 \geq x \geq b_1 \\ \frac{x - a_1}{b_1 - a_1} & a_1 < x < b_1 \\ \frac{x - a_2}{b_2 - a_2} & a_2 > x > b_2 \\ 0 & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$$

式中, $\mu(x)$ 为隶属函数, x 为评价因素的实际指标值, a_1 、 a_2 分别表示指标临界值的下限和上限; b_1 、 b_2 为最适值的上下界点。

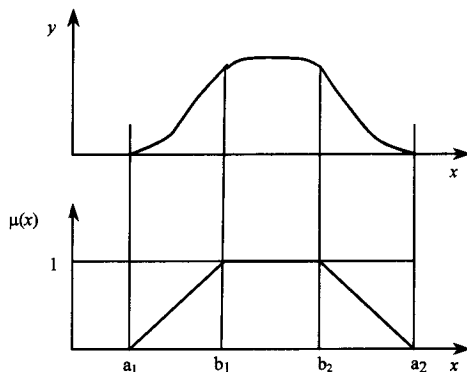


图 3 抛物线型曲线和梯形分布

Fig.3 Distribution of parabola and trapezoid

本研究中, pH 评价模型中 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别取 4.0、9.5、7.0、8.5。容重评价模型中 a_2 、 b_1 、 b_2 分别取 1.8、0.9、1.1(表 3)。

2.2 黄土丘陵区侵蚀土壤质量综合评价

2.2.1 评价方法的选择 土壤质量是各土壤属性综合作用的结果,因而在对土壤单因素评价之后,需要将单因素评价结果转换为由各评价因子构成的土壤质量的综合评价。本研究采用模糊数学中的加权综合法^[16,21]建立土壤质量综合评价模型:

$$SQI = \prod_{i=1}^n (K_i)^{c_i}$$

式中, SQI 是土壤质量指数 (Soil quality index), 是各个评价指标的隶属度值, 是第 i 个评价指标的权重, \prod 是连乘符号, n 是评价指标的个数。

表 3 抛物线型隶属函数曲线转折点取值

Table 3 Value of turning point in membership function of parabola model curve

转折点 Turning point	pH	容重 Bulk density (g/cm ³)	物理性粘粒 Physical clay (%)	砂粒 Sand (%)	粘粒 Clay (%)
a ₁	4.0	—	0	0	0
a ₂	9.5	1.8	100	100	100
b ₁	7.0	0.9	35	20	15
b ₂	8.5	1.1	40	50	25

该土壤质量综合评价模型的物理意义是: C_i 为各评价指标的隶属度,它的大小反映了各评价指标的优劣; K_i 为各评价指标的权重,它反映了各指标的重要性; $(K_i)^{C_i}$ 反映了各评价指标对土壤质量的贡献; 连乘运算体现各评价指标间的交互作用和最小因子限制率律。该模型同时考虑了评价指标值、评价指标权重、评价指标间的交互作用和最小因子限制率律对土壤质量的共同影响,比较符合实际。

为了比较该方法的评价结果,本文还采用了加权法和法对土壤质量指数进行计算:

$$SQI = \sum_{i=1}^n (K_i) \times C_i$$

式中, SQI 是土壤质量指数 (Soil quality index), C_i 是各个评价指标的隶属度值, K_i 是第 i 个评价指标的权重, n 是评价指标的个数。

为了全面反映黄土丘陵区侵蚀条件下的土壤质量情况,在综合前人研究结果的基础上^[10-14],本文以所测定的 29 项土壤属性作为综合评价指标 (复杂指标)。其中,土壤化学指标包括,全氮、全磷、有机质、活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、CaCO₃、pH、CEC; 物理指标包括砂粒、物理性粘粒、粘粒、结

构系数、微团聚体总量、微团聚体平均重量直径 (MicMWD)、水稳性团聚体、团聚体平均重量直径 (MWD)、总孔度、毛管孔度、容重、稳定入渗系数 (K_{10})、抗冲性; 生物指标包括微生物碳、微生物氮、磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、呼吸强度。同时,以通过因子分析法所筛选出的 8 项黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价指标 (有机质、 K_{10} 、土壤抗冲性、CEC、蔗糖酶、MWD、速效磷、MicMWD) 作为简化评价指标 (简单指标)。分别应用综合评价指标 (复杂指标) 和简化评价指标 (简单指标),采用上述两种模型对研究区 208 个样点的 10 种土地利用方式下的土壤质量进行了综合评价,并对两种指标体系及两套评价方法进行了比较分析。

如何确定各单因素的权重,这是综合评价的关键问题。以往研究中多采用人为打分来确定,为了避免受人为主观影响,本研究用多元统计分析中的主成分分析法来计算公因子方差,通过计算各个公因子方差占公因子方差总和的百分数,将公因子方差转换为 0~1 的数值,作为单项评价指标的权重值 K_i (表 4、表 5)。

表 4 黄土丘陵区侵蚀土壤质量简化评价指标 (简单指标) 权重

Table 4 Weight of simplified indicators for erosion soil quality on hilly Loess Plateau

评价指标 Indicator	有机质 OM	抗冲性 AS	K_{10}	CEC	蔗糖酶 Invertase	全磷 TP	MWD	MicMWD
公因子方差 Communalities	0.949	0.947	0.937	0.914	0.795	0.714	0.564	0.556
权重 Weight	0.149	0.149	0.147	0.143	0.125	0.112	0.088	0.087

通过 2.1 所建立的土壤质量单因素评价模型,将各评价指标量纲归一化,得到各指标的隶属度值 C_i 。

图 4 是应用土壤质量综合评价指标和简化评价指标对研究区 208 个样点的土壤质量综合评价结果的相关性。 $SQI-1$ 、 $SQI-2$ 、 $SQI-3$ 和 $SQI-4$ 分别为应用综合评价指标的加权和法、简化评价指标的加权和法、综合评价指标的加权综合法以及简化评价指标的加权综合法计算的土壤质量指数。

图 4 看出,不论是加权综合法还是加权和法、综合指标与简化指标的评价结果都有极显著的线性相关性,而且采用加权综合法时,两种指标体系评价结果的相关性更佳,直线斜率接近 1。表明所筛选的土壤质量简化评价指标能够反映综合评价指标的信息,评价结果具有相当高的代表性。同时,在应用加权综合法时,简化评价指标的评价结果更接近综合评价指标。

表 5 黄土丘陵区侵蚀土壤质量综合评价指标(复杂指标)权重
Table 5 Weight of integrated indicators for erosion soil quality on hilly Loess Plateau

评价指标 Indicator	有机质 OM	抗冲性 AS	磷酸酶 Phosphatase	微生物氮 MN	全氮 TN	蔗糖酶 Invertase	微生物碳 MC	K ₁₀	碱解氮 AN	CEC	脲酶 Urease	呼吸强度 RI	团聚体 WSA	LOC
公因子方差 Communalities	0.958	0.952	0.856	0.911	0.937	0.823	0.877	0.932	0.921	0.902	0.783	0.725	0.723	0.691
权重 Weight	0.0441	0.0438	0.0394	0.0419	0.0431	0.0378	0.0403	0.0429	0.0424	0.0415	0.036	0.0333	0.0332	0.0318

评价指标 Indicator	MWD	毛管孔度 CP	速效钾 AK	PC ¹⁾	粘粒 Clay	砂粒 Sand	Mic MWD	全磷 TP	CaCO ₃	速效磷 AP	pH	容重 BD	总孔度 TP	结构系数 SC	微团聚体 Micro aggregate
公因子方差 Communalities	0.712	0.631	0.447	0.592	0.634	0.698	0.627	0.594	0.633	0.65	0.512	0.817	0.877	0.8	0.531
权重 Weight	0.0327	0.029	0.0206	0.0272	0.0292	0.0321	0.0288	0.0273	0.0291	0.0299	0.0235	0.0376	0.0403	0.0368	0.0244

1)PC—物理性粘粒 Physical clay.

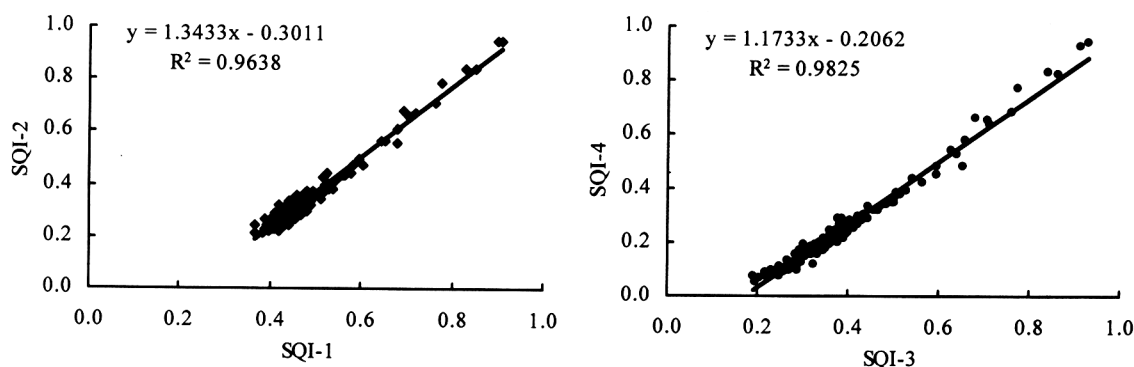


图 4 土壤质量综合指标与简化指标的评价结果的相关性

Fig.4 Correlation of soil quality evaluation result using integrated and simplified indicators

应用两种评价方法和两套评价指标体系对研究区土壤质量的综合评价(图 5)看出,与综合评价指标相比,简化评价指标的评价结果较低,变异较大;与加权法相比,加权综合法的评价结果较低,变异较大。尤其是在土壤质量指数较低的土地利用方式下,这种差异更加明显,真正体现了最小因子限制率律对土壤质量的影响。

就不同土地利用方式而言,两种评价方法和两套评价指标体系的评价结果非常一致。尤其是采用加权综合法时,综合评价指标与简化评价指标的评价结果完全一致。

此外,加权综合法的评价结果将不同土地利用方式下的土壤质量差异拉大,能够较好地反映土地利用方式变化对土壤质量的影响。

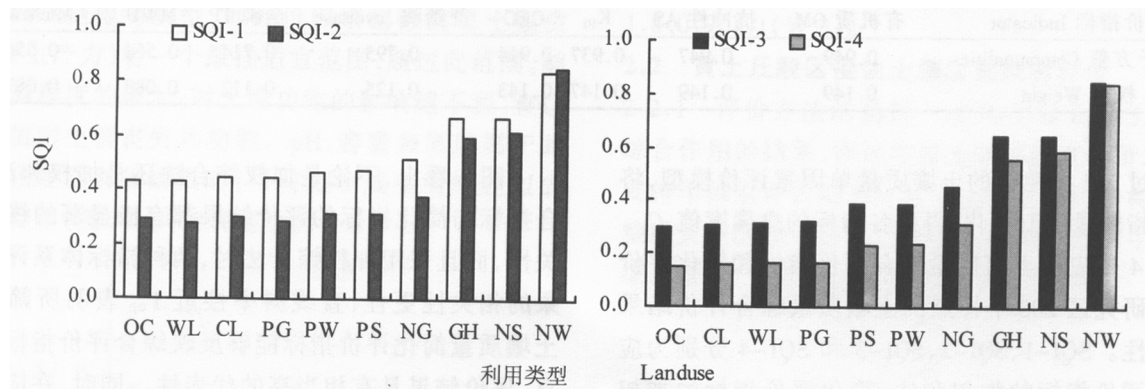


图 5 不同土地利用方式的土壤质量

Fig.5 Soil quality in different land use type

综上所述,应用加权综合法对土壤质量进行综合评价能够较好地反映土壤质量的实际情况,敏感地反映土地利用方式变化对土壤质量的影响。因此,为了全面反映研究区土壤质量状况及不同土地利用方式对土壤质量的影响,本文将对采用加权综合法的综合评价指标体系的评价结果(SQI-3)进行分析。

2.2.2 不同土地利用方式的土壤质量 对黄土丘陵区 10 种土地利用类型的表层土壤质量综合评价结果(表 6)表明,土壤质量在不同土地利用类型之间差异显著,比较结果为:天然乔木林地 > 天然灌木林地 > 大棚菜地 > 天然草地 > 人工乔木林地 > 人工灌木林地 > 人工草地 > 撂荒地 > 农地 > 果园。方差

分析及多重比较结果表明,果园、农地、撂荒地和人工草地的土壤质量显著低于人工乔灌林地、大棚菜地及天然乔灌草地土壤质量。人工乔灌林地、天然草地、大棚菜地与天然灌木地、天然乔木林地之间土壤质量差异显著或极显著,而果园、农地、撂荒地和人工草地之间以及人工乔灌林地之间土壤质量差异不显著。需要说明的是,本研究主要针对大棚菜地土壤肥力质量进行的,有关大棚菜地土壤环境质量及健康质量问题有待进一步研究。

天然乔木林地土壤质量指数是果园、农地、撂荒地和人工草地的 2.6~2.9 倍,是人工乔灌林地的 2.2 倍,为天然草地的 1.9 倍。

表 6 黄土丘陵区土壤质量指数(加权综合法—综合评价指标)

Table 6 Soil quality index on hilly Loess Plateau (weighted integrated method with integrated indicators)

利用方式 Land use	果园 OC	农地 CL	撂荒地 WL	人工草地 PG	人工灌木 PS	人工乔木 PW	天然草地 NG	大棚菜地 GH	天然灌木 NS	天然乔木 NW
样本数 Samples	9	73	46	13	14	28	13	4	4	4
平均值 Mean	0.295 Aa	0.309 Aa	0.310 Aa	0.324 ABa	0.387 BCb	0.390 BCb	0.457 Cc	0.650 D	0.652 D	0.852 E

注(Note):不同大小写字母表示差异达 1% 或 5% 显著水平。Different capital and small letters mean significant at 1% and 5% level.

不同土地利用类型间土壤质量指数变幅及变异性也有明显差异。以人工草地、大棚菜地和天然乔木林地土壤质量指数变幅较小,其最小值和最大值之间相差 1 倍多;而农地、天然草地和人工乔木林地土壤质量指数变幅较大,其最小值和最大值之间相差 2~3 倍。不同土地利用类型间土壤质量指数变异系数大小顺序为:天然乔木林地 < 人工草地 < 果园 < 人工灌木林地 < 撂荒地 < 大棚菜地 < 人工乔木林地 < 农地 < 天然草地 < 天然灌木林地。

研究区土壤质量指数平均 0.358,变幅为 0.19~0.93,各样点有机质含量变异较大,变异系数达

36.8%,这也反映了土地利用方式对土壤质量的影响。

2.2.3 侵蚀土壤质量分级 为了更加直观的评价不同土地利用类型下的土壤质量状况,根据土壤质量指数大小,将研究区土壤质量分为 5 级(表 7):低(VI)、较低(IV)、中(III)、较高(II)和高(I)。可以看出,天然乔木林地土壤质量属于高(I)级,天然灌木林地和大棚菜地土壤质量属于较高(II)级,天然草地土壤质量属于中(III)级,人工乔灌林地土壤质量接近中(III)级,人工草地、撂荒地、农地和果园土壤质量属于较低(IV)级,详见图 5。

表 7 黄土丘陵区土壤质量分级

Table 7 Soil quality classification on hilly Loess Plateau

土壤质量指数 Soil quality index	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
土壤质量分级 Soil quality classification	低(VI) Low	较低(IV) Lower	中(III) Middle	较高(II) Higher	高(I) High

对所有样点的土壤质量指数在各质量分级中的分布频率计算(表 8)结果发现,75%的天然乔木林地土壤质量属于高(I)级;50%的天然灌木地和 75%的大棚菜地土壤质量属于较高(II)级;土壤质

量属于中(III)级和较低(IV)级的人工乔灌林地分别约有 40%和 60%;土壤质量属于中(III)级和较低(IV)级的农地分别有 81%和 16%;几乎所有果园、撂荒地和人工草地土壤质量属于较低(IV)级。

表 8 黄土丘陵区土壤质量在各分级中的分布频率 (%)

Table 8 Soil quality distribution frequency in different class on hilly Loess Plateau

利用方式 Land use type	大棚菜地 GH	果园 OC	撂荒地 WL	农地 CL	人工草地 PG	人工灌木 PS	人工乔木 PW	天然草地 NG	天然灌木 NS	天然乔木 NW
低(VI)Low				3						
较低(IV)Lower		100	96	81	100	57	64	54	25	
中(III)Middle	25		4	16		43	36	23		
较高(II)Higher	75							23	50	25
高(I)High									25	75

总体而言,研究区土壤质量处于中等偏低水平。

3 结论

(1) 采用加权综合法对土壤质量进行综合评价能够较好地反映土壤质量的实际情况,敏感地反映土地利用方式变化对土壤质量的影响。该模型同时考虑了评价指标值、评价指标权重、评价指标间的交互作用和最小因子限制率律对土壤质量的共同影响,比较符合实际。

(2) 应用因子分析法所筛选的 8 项土壤质量简化评价指标能够很好地反映 29 项综合评价指标的信息,简化评价指标具有较高的代表性。

(3) 拟定了黄土丘陵区侵蚀土壤质量分级标准,将研究区土壤质量分为低(VI)、较低(IV)、中(III)、较高(II)和高(I)5 级。黄土丘陵区 10 种土地利用类型间土壤质量差异显著,以天然乔木林地土壤质量最佳,属 1 级;其次是天然灌木林地和大棚菜地,土壤质量属 2 级;天然草地土壤质量属于 3 级,人工乔灌林地土壤质量接近 3 级,人工草地、撂荒地、农地和果园土壤质量属于 4 级。

参考文献:

- [1] John J B, Thomas B M, Douglas L K *et al.* Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 2115-2124.
- [2] John J B, Thomas B M, Douglas L K *et al.* Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern mississippi loess hills and palouse prairie [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 2125-2135.
- [3] Filip Z. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, Special Issue, 88(2): 169-174.
- [4] Herrick J E. Soil quality: An indicator of sustainable land management [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 75-83.
- [5] Webb K T, Wang C, Astatkie T, Langille D R. Spatial and temporal trends in soil properties at a soil quality benchmark site in central Scotia [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2000, 80: 567-575.
- [6] Carter M R, Sanderson J B. Influence of conservation tillage and rotation length on potato productivity, tuber disease and soil quality parameters on a fine sandy loam in eastern Canada [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 63(1-2): 1-13.
- [7] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响—以河北省遵化市为例[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 447-455.
Guo X D, Fu B J, Chen L D *et al.* Effects of landuse on soil quality in a killy area-A case study in Zunhua county of Hebei province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 447-455.
- [8] 胡金明,刘兴土. 三江平原土壤质量变化评价与分析[J]. *地理科学*, 1999, 19(5): 417-421.
Hu J M, Liu X T. Evaluation and analysis on soil quality changes in the Sanjiang Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(5): 417-421.
- [9] 胡月明,万洪富,吴志峰,等. 基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(3): 266-274.
Hu Y M, Wan H F, Wu Z F *et al.* GIS based soil quality evaluation with fuzzy variable weight [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 266-274.
- [10] 贺秀斌. 林地开垦土壤质量的结构指标响应[J]. *水土保持学报*. 2002, 16: 110-112.
He X B. Response of structural indicators to soil quality in reclaimed woodland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16: 110-112.
- [11] 史衍玺,唐克丽. 林地开垦加速侵蚀下土壤养分退化的研究 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(4): 26-33.
Shi Y X, Tang K L. Soil nutrient degradation under influence of forest land accelerated erosion [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1996, 2(4): 26-33.
- [12] Li Y, Lindstrom M J. Evaluating soil quality soil redistribution relationship on terraces and steep hilllope [J]. *SSSAJ*, 2001, 65: 1500-1508.
- [13] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Li Yong. Vegetation root and soil anti-scourability in Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [14] 刘国彬. 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 [J]. *水土保持研究*, 1997, 4(5): 122-128.
Liu G B. Vegetation restoration and improvement process of soil anti-

- scourability in Loess Plateau. II. Improvement of soil anti-scourability during vegetation restoration[J]. Research of soil and water conservation, 1997, 4(5): 122-128.
- [15] 孙波,赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地理科学进展,1999,18(2):118-128.
Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation[J]. Progress in Geography, 1999, 18(2):118-128.
- [16] 王建国,杨林章,单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):176-183.
Wang J G, Yang L Z, Shan Y H. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(2): 176-183.
- [17] 王效举,龚子同. 亚热带小区域水平上土壤质量时空变化的定量评价[J]. 热带亚热带土壤科学, 1996,5(4):229-231.
Wang X J, Gong Z T. Quantitative evaluation of temporal and spatial variation in soil quality at a small area level in subtropical China[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1996, 5(4):229-231.
- [18] 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[J]. 土壤学报,1998,35(1):135-139.
Wang X J, Gong Z T. Assessment and prediction of soil changes under different land use patterns at a small area level in red soil hilly region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 135-139.
- [19] 张学雷,张甘霖,龚子同. SOTER数据库支持下的土壤质量综合评价—以海南岛为例[J]. 山地学报,2001,19(4):377-380.
Zhang X L, Zhang G L, Gong Z T. Soil quality indexing system and evaluation for Hainan island based upon Haisoter [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(4): 377-380.
- [20] 曹志洪. 解译土壤质量演变规律, 确保土壤资源持续利用[J]. 世界科技研究与发展,2001,23(3):28-32.
Cao Z H. Study on the principles of soil quality changing to promote sustainable use of soil resources[J]. World Sci-tech R&D, 2001, 23(3): 28-32.
- [21] 万存绪,张效勇. 模糊数学在土壤质量评价中的应用[J]. 应用科学学报,1991,9(4):359-365.
Wang C X, Zhang X Y. Application of fuzzy mathematics in the appraisal of soil quality[J]. Journal of Applied Sciences, 1991, 9(4): 359-365.
- [22] Blair G J, Rod D B, Lefroy, Leanne Liale. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Aust. J. Agric. Res., 1995, 46: 1459-1466.
- [23] 徐明岗,于荣,王伯仁. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料, 2000(6):3-7.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Progress on the study of soil active organic matter[J]. Soils and Fertilizers, 2000(6): 3-7.
- [24] Liu G B, Xu M X, Coen R. Study on soil characteristics in a small watershed in the hilly-gullied area on the Loess Plateau in China [J]. Catena, 2003, 54: 31-44.
- [25] 张成娥,梁银丽,贺秀斌. 地膜覆盖玉米对土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2002,22(4):508-512.
Zhang C E, Liang Y L, He X B. Effects of plastic cover on soil microbial biomass[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 508-512.
- [26] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,1985.
Department of Microbiology, Institute of Soil Science, CAS. Study methods for soil microbiology[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [27] Xu M X, Liu G B, Hu W Y. Soil characteristics and its dynamic variation in a small catchment on the loess plateau of china [A]. Gao A *et al.* Proceedings of 12th international soil conservation organization conference[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002, 2: 51-57.
- [28] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and profile description [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.