

黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响*

许明祥^{1,2**} 刘国彬^{1,2} 赵允格^{1,2}

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

摘要 利用统计学方法分析了黄土丘陵区中部 700 km² 区域土壤质量的变异性、影响因子及影响程度. 结果表明: 研究区不同土壤质量指标变异性有很大差异. 土壤 pH、结构系数、粉粒、比重、容重、总孔隙度和毛管孔隙度及过氧化氢酶为弱变异性指标; 土壤养分(N、P、K)含量、CaCO₃ 含量、阳离子交换量(CEC)、粘粒、微团聚体平均质量直径(MICMMD)、团聚体平均质量直径(MMD)、水稳性团聚体、呼吸强度、微生物熵、蔗糖酶、磷酸酶、呼吸熵及微生物生物量碳和氮为中等变异性指标; 土壤活性有机碳、有效磷、抗冲性、渗透系数及脲酶为强变异性指标. 土地利用类型变化对土壤有机质、氮含量、水稳性团聚体、渗透性、微生物生物量碳和氮、磷酸酶、蔗糖酶及呼吸强度等土壤动态质量指标的变异性起主导作用. 变异性较小的CaCO₃、全磷、全钾、CEC、质地、比重等内在土壤质量指标的变异性主要来源于地形等环境因子的差异. 土地利用类型可解释 97% 的土壤质量指数的变异性, 是黄土丘陵区土壤质量变异的主导因子. 在黄土丘陵区土壤质量评价中, 应当充分考虑土地利用类型和地形等环境因子的差异.

关键词 土壤质量 变异性 土地利用 环境因子 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2011)02-0409-09 中图分类号 S158 文献标识码 A

Effects of land use and environmental factors on the variability of soil quality indicators in hilly Loess Plateau region of China. XU Ming-xiang^{1,2}, LIU Guo-bin^{1,2}, ZHAO Yun-ge^{1,2} (¹ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2011 22(2): 409-417.

Abstract: Classical statistics methods were adopted to analyze the soil quality variability, its affecting factors, and affecting degree at a regional scale (700 km²) in the central part of hilly Loess Plateau region of China. There existed great differences in the variability of test soil quality indicators. Soil pH, structural coefficient, silt content, specific gravity, bulk density, total porosity, capillary porosity, and catalase activity were the indicators with weak variability; soil nutrients (N, P, and K) contents, CaCO₃ content, cation exchange capacity (CEC), clay content, micro-aggregate mean mass diameter, aggregate mean mass diameter, water-stable aggregates, respiration rate, microbial quotient, invertase and phosphatase activities, respiratory quotient, and microbial carbon and nitrogen showed medium variation; while soil labile organic carbon and phosphorus contents, erosion-resistance, permeability coefficient, and urease activity were the indicators with strong variability. The variability of soil CaCO₃, total P and K, CEC, texture, and specific gravity, etc. was correlated with topography and other environmental factors, while the variability of dynamic soil quality indicators, including soil organic matter content, nitrogen content, water-stable aggregates,

* 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407205)、中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-443)和中国科学院“西部之光”人才培养计划项目资助.

** 通讯作者 E-mail: xuming@nwsuaf.edu.cn Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
2010-07-19 收稿 2010-11-15 接受.

permeability, microbial biomass carbon and nitrogen, enzyme activities, and respiration rate, was mainly correlated with land use type. Overall, land use pattern explained 97% of the variability of soil quality indicators in the region. It was suggested that in the evaluation of soil quality in hilly Loess Plateau region, land use type and environmental factors should be fully considered.

Key words: soil quality; variability; land use; environmental factor; hilly Loess Plateau.

土壤是在自然和人为作用影响下形成和发育的,具有明显的时间和空间变化特征。由于受母质、气候、植被、地形及人为等作用的影响,土壤性质在不同的时空尺度上存在一定的差异,其中土壤特征在空间分布上的非均一性称为土壤特性的空间变异性^[1]。研究土壤特性的时空分异可以更好地了解各种管理措施对土壤质量的影响,准确预测土壤质量的变化规律,同时还能为土壤属性研究中合理取样、土壤退化防治及土壤质量保育提供理论依据。

土壤特性的变异性是普遍存在的,其变异来源包括系统变异和随机变异两种。土壤特性的系统变异是由母质、气候、水文、生物、地形、时间、人类活动等差异引起的,而随机变异则是由取样、分析等误差引起的^[2]。自20世纪70年代以来,国内外开展了大量土壤空间变异研究,研究内容主要集中在土壤物理特性(如颗粒组成^[3]、团聚体大小^[4-5]、水分含量^[6]、容重^[7]、水力传导度等^[7])、土壤养分^[8-10]、盐分^[11]及有机质含量等方面^[12-13]。空间尺度包括地块、坡面、小流域、县域以及区域等不同尺度。研究方法已经由最初的经典统计学方法发展到了时序分析方法、地统计学方法、随机模拟方法、分形和分数维方法以及应用GIS的研究方法,目前运用较多的是地统计学方法。研究结果主要是得出这些空间变异因子的概率分布类型、相关系数、相关距离、半方差函数及经验表达式等。目前的应用主要是确定合理的取样数目和优化插值,进而绘制等值线图。

尽管土壤特性的变异性已有大量研究并取得重要进展,但大多数研究未能就产生变异性的影响因素进行定量分析,尤其是在复杂地形条件下人类活动和环境因子对土壤变异性的影响尚不明确。从土壤质量角度综合研究不同土壤特性的变异性及其影响因素有助于科学地认识土壤变异性的本质。为此,本文以黄土丘陵区中部几个小流域为研究单元,系统分析了不同土地利用类型及环境条件下32项土壤理化和生物学特性及土壤质量的变异性,并对土地利用方式及环境因子对这些土壤特性的影响程度进行了评判,以期为区域土壤质量评价、土壤保育及合理取样等提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究样地选择在陕北黄土丘陵沟壑区安塞县中部和南部的县南沟、纸坊沟、北宋塔、桥庄村陀山、坊塔以及延安市附近的燕沟等小流域(图1),可代表黄土丘陵区中部700 km²区域的土壤、地形和气候环境。研究区属暖温带半干旱季风气候,平均海拔1200 m,相对高差100~300 m,年均气温8.8℃,年均降水量505.3 mm,无霜期160 d左右。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

在研究区选取不同土地利用类型(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)样地297个,记录取样点的坡度、坡位、坡向、地形、海拔等环境因子特征(表1)。在取样点周围随机选择5个点,用土钻取0~20 cm土壤混合样,风干,剔除土样中的根系、石块等杂物,测定32项土壤理化和生物属性(表2)。其中化学指标包括全氮、全磷、全钾、有机质、活性有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾、CaCO₃、pH、阳离子交换量(CEC);物理指标包括粉粒、粘粒、微团聚体平均质量直径(micro-aggregate mean mass diameter, MICMMD)、结构系数、水稳性

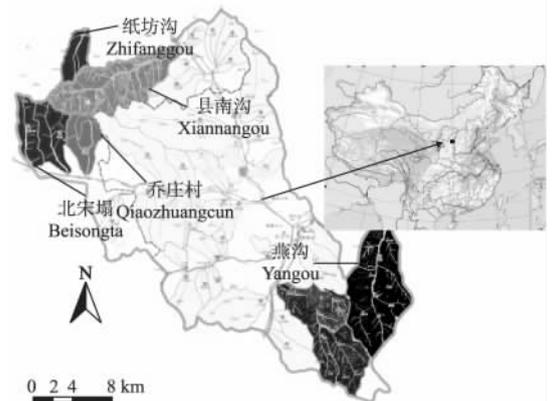


图1 取样小流域位置

Fig. 1 Location of the sampling watershed.

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic status of the study plots

样点数 Sample number	土地利用类型 Land use type	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	地形 Topography	植被 Vegetation
4	大棚菜地 Greenhouse vegetable land	1060 ~ 1049	0			FP	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i> , 番茄 <i>Lycopersicon esculentum</i> , 辣椒 <i>Capsicum frutescens</i>
20	人工灌木林 Planted shrub land	1156 ~ 1341	5 ~ 34	U4 ,M12 ,L4	A2 , U8 , SA4 , SU6	GS5 ,HS15	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>
10	果园 Orchard	1211 ~ 1374	20 ~ 32	U3 ,M3 ,L4	A4 ,SA2 ,SU2	GS2 ,HS3 ,TR5	苹果 <i>Malus domestica</i>
63	撂荒地 Abandoned land	1122 ~ 1397	10 ~ 36	U14 ,M41 ,L8	A13 ,U11 , SA21 ,SU18	GS4 ,HS56 ,TR3	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> , 茵陈蒿 <i>A. capillaris</i> , 长芒草 <i>Stipa bungeana</i> , 铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i>
35	人工乔木林 Planted woodland	1101 ~ 1373	15 ~ 35	U7 ,M19 ,L9	A4 ,U4 ,SA14 , SU13	HS20 ,GS15	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>
126	农地 Cropland	1024 ~ 1386	3 ~ 30	U6 ,L5 ,M77	A7 ,U40 ,SA43 , SU7	HS88 ,TR27 , FP11	谷子 <i>Setaria italica</i> , 玉米 <i>Zea mays</i> , 荞麦 <i>Fagopyrum esculentum</i>
14	人工草地 Planted grassland	1226 ~ 1428	7 ~ 34	U8 ,M6	A2 ,U1 ,SA9 , SU2	HS13 ,TR1	草木樨 <i>Melilotus suaveolens</i> , 苜蓿 <i>Medicago sativa</i>
22	天然草地 Natural grassland	1081 ~ 1297	12 ~ 40	U6 ,M10 ,L6	SA8 ,SU7 ,U4 , A3	GS	铁杆蒿 <i>A. sacrorum</i> , 长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
4	天然灌木林 Natural shrub land	1123 ~ 1355	25 ~ 27	L	U3 ,SU1	HS2 ,GS2	水荀子 <i>Cotoneaster multiflora</i> , 黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>
4	天然乔木林 Natural woodland	1125 ~ 1371	15 ~ 35	U3 ,L1	U2 ,SA2	GS2 ,HS2	辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i> , 白桦 <i>Betula platyphylla</i>

U、M、L 分别表示上、中、下坡位, A、U、SA、SU 分别表示阳坡、阴坡、半阳坡和半阴坡, FP、GS、HS、TR 分别表示川地、沟坡、梁峁坡和梯田, 坡度、坡向、地形中的数字代表样点数, U、M、L meant upper, middle, and lower position, respectively. A、U、SA、SU meant adret, udbac, semi-adret, and semi-udbac, respectively. FP、GS、HS、TR meant flood plain, gully slope, hillside, and terrace, respectively. The numbers in the description of slope position, slope aspect and topography were the number of samples.

团聚体、团聚体平均质量直径 (mean mass diameter, MMD)、总孔隙度、毛管孔隙度、比重、容重、渗透系数 (K_{10})、抗冲性; 生物指标包括微生物生物量碳和氮、磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、微生物熵、呼吸强度和呼吸熵。测定方法见文献 [14]。对上述 32 项指标采用加权综合法计算得出土壤质量指数 (soil quality index, SQI) [14]:

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

式中: 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。

1.3 数据处理

土壤特性变异性的的大小用变异系数 CV 的大小来反映。CV ≤ 10% 为弱变异性, 100% < CV < 10% 为中等变异性, CV ≥ 100% 为强变异性 [15]。

为了区分土地利用类型及地形因子对土壤特性的影响程度, 用 SPSS 12.0 统计软件中一般线性模型 (general loglinear analysis, GLM) 的方差成分估计模块 (variance components analysis) 计算了土地利用及地形因子等在土壤理、化、生物属性和土壤质量指数变异 (方差) 中所占的百分比, 并对其影响的显著性程度进行了检验。百分比的大小反映了各因子对

土壤特性的影响程度。以土地利用为固定因子, 坡度、坡位、坡向、海拔、地形等为随机因子, 用最小二乘无偏估计法计算土壤特性的方差。

将定性的坡位、坡向和地形因子赋以不同的编码, 使其定量化。坡位以 1 表示上坡, 2 表示中坡, 3 表示下坡。坡向以 1 表示阴坡, 2 表示半阴半阳坡, 3 表示阳坡。地形以 1 表示川台地和梯田, 2 表示梁峁坡, 3 表示沟坡。

2 结果与分析

2.1 土壤质量指标的变异性

2.1.1 土壤物理性质的变异性 表 3 是研究区土壤物理性质的变异系数, 土壤结构系数、比重、粉粒、容重、总孔隙度和毛管孔隙度的变异性很小, 为弱变异性, 其中以比重、粉粒和结构系数的变异性最小。粘粒和 MICMMD 的变异性较小; 水稳性团聚体和 MMD 的变异性较大, 为中等变异性; 抗冲性和渗透系数的变异性最大, 为强变异性。不同土地利用类型下土壤物理性质的变异性较总体变异性小。

就不同土地利用类型而言, 农地和果园土壤物理性质的变异性较大, 人工草地和天然林地土壤物理性质的变异性较小。土壤水稳性团聚体及 MMD

表 2 研究样地土壤理化和生物属性的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil chemophysical and biological properties in the study plots

土壤属性 Soil attributes	样本数 Sampling number	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准误 SE
全氮 Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	297	0.21	2.91	0.48	0.020
全磷 Total P ($g \cdot kg^{-1}$)	248	0.41	1.62	0.61	0.007
全钾 Total K ($g \cdot kg^{-1}$)	297	9.25	98.02	23.03	0.498
有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	297	2.90	66.20	8.64	0.406
碱解氮 Available N ($mg \cdot kg^{-1}$)	297	12.11	204.61	33.94	1.491
速效磷 Available P ($mg \cdot kg^{-1}$)	251	0.48	168.67	4.83	1.070
速效钾 Available K ($mg \cdot kg^{-1}$)	233	37.00	361.00	94.28	2.986
CaCO ₃ ($g \cdot kg^{-1}$)	297	21.91	155.66	110.47	0.820
pH	212	7.86	9.24	8.77	0.011
CEC ($cmol \cdot kg^{-1}$)	297	4.11	16.57	5.09	0.075
粉粒 Silt (%)	286	53.00	73.20	66.92	0.114
粘粒 Clay (%)	286	15.50	34.70	22.53	0.128
结构系数 Structure coefficient	90	76.22	97.34	89.69	0.395
微团聚体平均质量直径 MICMMD (mm)	286	3.30	7.60	5.47	0.030
团聚体 Aggregate (%)	297	7.50	91.30	44.04	0.880
团聚体平均质量直径 MMD (mm)	297	0.07	4.24	1.22	0.050
毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	291	37.97	63.79	48.29	0.130
容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	297	0.78	1.45	1.14	0.004
比重 Specific gravity ($g \cdot cm^{-3}$)	78	2.52	2.69	2.59	0.003
总孔隙度 Total porosity (%)	253	44.33	69.36	54.29	0.171
渗透系数 Infiltration coefficient (K_{10})	295	0.01	6.95	0.62	0.049
抗冲性 Anti-scourability ($L \cdot min^{-1} \cdot g^{-1}$)	297	1.66	36.64	1.81	0.249
微生物生物量碳 Microbial biomass C ($mg \cdot kg^{-1}$)	297	12.92	380.17	58.91	2.236
微生物生物量氮 Microbial biomass N ($mg \cdot kg^{-1}$)	297	2.71	75.16	12.20	0.480
磷酸酶 Phosphate ($mg \text{ phenol} \cdot g^{-1} \text{ soil}$)	296	0.78	11.36	2.03	0.063
过氧化氢酶 Catalase ($ml \text{ 0.1 mol} \cdot L^{-1} KMnO_4 \cdot g^{-1}$)	297	6.62	9.04	8.00	0.109
蔗糖酶 Invertase [$ml \text{ 0.1 mol} \cdot L^{-1} Na_2S_2O_3 \cdot g^{-1} \text{ soil} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$]	297	0.60	8.59	2.29	0.053
脲酶 Urease [$\mu g \cdot NH_3-N \cdot g^{-1} \text{ soil} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$]	297	0.12	12.22	1.67	0.070
呼吸强度 Respiration intensity [$mg \text{ CO}_2 \cdot g^{-1} \text{ soil} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$]	297	0.18	1.36	0.44	0.007
微生物熵 Microbial quotient (%)	282	0.33	3.15	1.28	0.017
呼吸熵 Respiratory quotient (%)	297	0.82	12.86	2.34	0.049

表 3 土壤物理性质变异系数

Table 3 Variation coefficient of soil physical properties (%)

土地利用类型 Land use type	水稳性 团聚体 Water stable aggregate	团聚体 平均质量 直径 MMD	抗冲性 Anti- scourability	渗透系数 Infiltration coefficient	结构系数 Structure coefficient	微团聚体 平均质量 直径 MICMMD	粘粒 Clay	粉粒 Silt	比重 Specific gravity	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity
大棚菜地 Greenhouse vegetable land	11.8	49.2	50.3	45.0	6.0	11.5	9.7	3.1	0.8	3.5	6.2	5.3
果园 Orchard	5.2	19.0	292.3	51.0	5.4	9.1	9.1	3.2	0.5	2.0	1.9	2.0
撂荒地 Abandoned land	34.5	32.0	157.4	39.2	3.2	16.3	12.1	3.0	1.9	7.4	7.3	7.3
农地 Cropland	48.8	69.5	406.0	50.7	2.7	15.8	16.9	3.1	1.4	5.5	5.6	4.9
人工草地 Planted grassland	6.2	14.1	90.0	31.1	2.1	13.7	8.0	2.1	0.2	7.0	5.9	6.7
人工灌木林 Planted shrub land	22.8	27.8	129.1	27.5	0.6	9.6	15.6	0.9	0.2	15.2	17.5	1.4
人工乔木林 Planted woodland	38.3	48.5	97.2	94.4	3.3	24.3	11.0	1.6	1.0	11.2	6.2	4.4
天然草地 Natural grassland	21.2	25.9	129.3	83.7	3.4	10.1	7.5	1.6	1.0	11.6	13.4	5.2
天然灌木林 Natural shrub land	5.8	7.0	85.2	34.1	10.6	29.4	19.1	5.3	1.7	14.1	9.3	4.3
天然乔木林 Natural woodland	15.4	23.7	46.4	16.4	8.7	25.2	12.0	2.6	2.4	6.8	4.3	8.6
总体 Total	49.3	63.8	236.2	141.8	4.2	14.3	15.1	2.9	1.5	10.0	8.9	7.4

的变异性以农地较大, 达 50% ~ 70%, 天然灌木林地较小, 不足 10%。人工乔木林和天然草地土壤渗透系数的变异系数较大, 接近强变异性。农地、果园、人工灌木林地等利用类型下土壤抗冲性的变异较大, 属强变异性。

2.1.2 土壤化学性质的变异性 从表 4 可以看出, 土壤 pH 的变异性很小, 为弱变异性; 其余土壤化学性质的变异性按大小顺序依次为: CaCO_3 < 全磷 < 全钾 < CEC < 速效钾 < 全氮 < 有机质、有效氮, 这些指标的变异性较小, 为中等变异性; 土壤活性有机碳和

有效磷的变异性较大, 为强变异性, 其中以有效磷的变异性最大。与研究区土壤物理性质的变异性相似, 在不同土地利用类型下, 各化学性质的变异性较总体变异性小。

就不同土地利用类型而言, 土壤有机质、全氮、有效氮的变异性以天然灌木林地和天然草地较大, 大棚菜地土壤全磷、农地土壤有效磷、人工草地土壤 CEC 和速效钾的变异性较大。

2.1.3 土壤生物性质的变异性 由表 5 可知, 土壤过氧化氢酶的变异性很小, 为弱变异性; 其次依次为

表 4 土壤化学性质变异系数

Table 4 Variation coefficient of soil chemical properties (%)

土地利用类型 Land use type	有机质 Organic matter	全 N Total N	活性有机 C Labile organic C	全 P Total P	全 K Total K	有效氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	阳离子 交换量 CEC	CaCO_3	pH
大棚菜地 Greenhouse vegetable land	40.0	33.8	44.8	34.2	3.9	42.2	52.0	73.7	14.0	5.5	7.0
果园 Orchard	15.2	11.7	62.8	9.3	30.6	20.2	49.5	16.2	4.6	7.7	1.1
撂荒地 Abandoned land	27.4	24.5	61.8	9.9	21.4	36.3	37.2	41.4	10.9	11.0	1.2
农地 Cropland	39.0	37.4	55.8	10.5	15.1	42.1	83.1	28.3	13.5	14.7	1.9
人工草地 Planted grassland	8.9	11.6	58.6	7.8	5.0	28.7	44.7	86.3	52.4	12.7	1.3
人工灌木林 Planted shrub land	32.6	28.8	39.0	7.2	21.9	33.9	50.2	37.3	14.0	9.6	1.0
人工乔木林 Planted woodland	38.4	29.9	55.6	9.1	21.2	34.4	37.9	33.6	5.4	12.0	1.4
天然草地 Natural grassland	62.5	53.3	58.7	11.9	22.6	51.5	31.6	27.8	8.1	15.0	1.7
天然灌木林 Natural shrub land	66.9	63.3	57.8	4.4	32.8	70.3	67.7	44.2	8.2	26.9	2.6
天然乔木林 Natural woodland	40.1	30.3	50.5	5.6	32.2	19.9	57.2	15.7	16.7	27.1	2.5
总体 Total	86.2	73.9	124.4	19.8	18.0	81.6	348.9	48.3	45.0	14.9	1.9

表 5 土壤生物性质变异系数

Table 5 Variation coefficient of soil biological properties (%)

土地利用类型 Land use type	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	微生物 生物量 C Microbial biomass carbon	微生物 生物量 N Microbial biomass nitrogen	微生物熵 Microbial quotient	呼吸强度 Respiration intensity	呼吸熵 Respiratory quotient
大棚菜地 Greenhouse vegetable land	25.5	5.8	17.7	43.5	28.6	31.1	19.6	17.2	43.7
果园 Orchard	28.0	4.8	12.5	15.1	51.3	8.4	59.7	56.1	93.8
撂荒地 Abandoned land	46.7	11.0	39.2	81.9	45.2	57.5	60.0	22.7	42.8
农地 Cropland	26.2	4.9	39.1	71.4	26.2	16.6	18.5	17.4	17.8
人工草地 Planted grassland	21.3	1.2	11.6	16.3	5.9	8.5	13.0	20.0	25.6
人工灌木林 Planted shrub land	17.0	8.0	21.8	58.0	38.5	22.9	30.5	26.7	24.1
人工乔木林 Planted woodland	52.3	9.6	48.3	74.1	44.1	41.6	51.4	18.6	55.6
天然草地 Natural grassland	76.2	7.7	70.1	63.3	69.9	47.2	46.9	20.6	102.5
天然灌木林 Natural shrub land	9.1	2.6	22.9	17.7	88.8	84.6	44.5	27.8	50.3
天然乔木林 Natural woodland	47.6	4.5	24.6	56.7	17.3	25.1	22.5	23.3	38.9
总体 Total	82.8	8.6	69.6	102.2	91.4	90.9	55.5	49.0	84.7

呼吸强度、微生物熵、蔗糖酶、磷酸酶、呼吸熵和微生物生物量碳和氮,这些生物指标的变异性较小,为中等变异性;在所测定的土壤生物指标中,土壤脲酶的变异性最大,为强变异性.与研究区土壤理化性质的变异性相似,不同土地利用类型下各生物性质的变异性较总体变异性小.

就不同土地利用类型而言,撂荒地、天然草地和人工乔木林地土壤生物性质变异性较大,人工草地土壤生物性质变异性较小.以天然草地土壤磷酸酶和蔗糖酶、撂荒地土壤脲酶、天然灌木林地土壤微生物生物量碳和氮、果园土壤呼吸强度的变异系数最大,表现出较强的变异性.

2.2 土地利用及环境因子对土壤质量变异性的影响

土地利用类型及环境因子在土壤物理性质变异

(方差)中所占的百分比见表6.土地利用类型对土壤结构系数及渗透性有显著影响($P < 0.05$).土地利用类型变化可以解释土壤MICMMD和水稳性团聚体变异的65%、MMD变异的59%、 K_{10} 变异的58%,毛管孔隙度和容重变异中大约50%是由土地利用类型变化引起的.环境因子对土壤质地、比重等有较大影响,地形差异可以解释土壤质地变异的70%左右,地形和坡位可以解释容重变异的49%,坡度可以解释比重变异的42%.总孔隙度变异的77%来源于坡向、地形、坡度和坡位的综合影响.

由表7可知,土地利用类型变化是土壤氮素和有机质变异的主要来源($P < 0.01$),可以解释土壤全氮变异的91%、有效氮变异的94%、有机质和活性有机碳变异的85%和73%.土地利用对土壤有效磷、速效钾、pH和CEC也有较大影响,能够解释这

表6 土地利用类型及环境因子在土壤物理性质变异(方差)中所占的百分比

Table 6 Contribution of land use type and environmental factors to the variation of soil physical properties (%)

方差来源 Variance source	抗冲性 Anti-scourability	粉粒 Silt	粘粒 Clay	结构系数 Structure coefficient	微团聚体 平均质量 直径 MICMMD	水稳性 团聚体 平均质量 直径 MMD aggregate	团聚体 平均质量 直径 MMD	毛管孔 隙度 Capillary porosity	容重 Bulk density	比重 Specific gravity	总孔隙度 Total porosity	渗透系数 K_{10} Infiltration coefficient
土地利用方式 Land use type	20.68**	2.393	2.173	3.836	0.584**	165.2*	0.501	5.809	0.083	0.0003	2.897	0.060*
地形 Topography	0.462	18.08	24.94	1.035	0.022	29.92	0.150	1.347	0.042	0.0001	1.737	0.011
海拔 Altitude	0	0.754	0.697	0.322	0.025	5.693	0.035	1.140	0.001	0.000	0.233	0.010
坡度 Slope	4.777	4.838	3.200	1.957	0.129**	26.12	0.108	2.715	0.003	0.0004	1.952	0.016
坡位 Slope position	0	0.428	0.321	0.994	0.029	23.34	0.041	0.471	0.045	0.0001	2.102	0.002
坡向 Slope aspect	0.404	0	2.610	3.145	0.109**	2.665	0.015	1.267	0.001	0.0001	4.799	0.004
	2	0	8	28	12	1	2	10	1	5	35	4

每一指标的第1行为该指标在不同土地利用类型间的方差,第2行为该方差占这一指标总方差的百分比(%) The data on top and bottom of each line were the variance of soil attribute and the variance percentage of the attribute to total variance of the attributes, respectively. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

表7 土地利用类型及环境因子在土壤化学性质变异(方差)中所占的百分比

Table 7 Contribution of land use type and environmental factors to the variation of soil chemical properties (%)

方差来源 Variance source	全N Total N	全P Total P	全K Total K	有机质 Organic matter	活性 有机碳 Labile organic C	有效N Available N	有效P Available P	速效K Available K	CaCO ₃	pH	CEC
土地利用方式 Land use type	0.172**	0.0001	0.75	93.78**	1.954**	891.8**	0.372	594.6	20.56	0.010*	1.919**
地形 Topography	0.001	0.0001	1.08	0.31	0.079	2.51	0.127	181.2	26.94	0.002	0.228
海拔 Altitude	0	0.001*	0.20	12.92**	0.105	17.52	0.161	103.8	19.94	0.005*	0.233
坡度 Slope	0	0.0005	2.03	0.69	0.481	1.74	0.024	33.64	49.16*	0	1.081
坡位 Slope position	0	0.0003	2.25	1.35	0.045	7.00	0.078	58.17	6.59	0.001	0.024
坡向 Slope aspect	0.002	0.0002	5.14*	1.40	0.019	24.40**	0.019	10.75	31.96*	0.003*	0.387
	91	5	6	85	73	94	48	61	13	48	50
	0	5	9	0	3	16	18	17	9	6	6
	6	45	2	12	4	2	21	11	13	24	6
	0	23	18	1	18	0	3	3	32	0	28
	2	13	20	1	1	1	10	6	4	5	1
	0.002	0.0002	5.14*	1.40	0.019	24.40**	0.019	10.75	31.96*	0.003*	0.387

表 8 土地利用类型及环境因子在土壤生物性质及土壤质量变异(方差)中所占的百分比

Table 8 Contribution of land use type and environmental factors to the variation of soil biological properties and soil quality (%)

方差来源 Variance source	微生物 生物量 C Microbial biomass carbon	微生物 生物量 N Microbial biomass nitrogen	磷酸酶 Phosphatase	过氧化 氢酶 Catalase	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	微生物熵 Microbial quotient	呼吸强度 Respiration intensity	呼吸熵 Respiratory quotient	土壤质量 指数 Soil quality index(SQI)
土地利用方式 Land use type	2192**	102.6*	2.693*	0.068	1.418*	0.870	0.044*	0.026**	3.220*	0.029**
地形 Topography	56	43	50	11	50	32	15	72	36	97
海拔 Altitude	395.1	19.92	0.584	0.020	0.160	0.298	0	0.002	0	0.0003
坡度 Slope	10	8	11	3	6	11	0	6	0	1
坡位 Slope position	57.6	0	0.151	0.162	0.055	0.257	0.054	0.003	4.947*	0.0002
坡向 Slope aspect	1	0	3	25	2	10	20	9	56	1
	1091	100.3	1.728	0.184	1.028	0.417	0.083	0.003	0	0.0004
	28	42	31	28	37	15	29	7	0	1
	161.1	12.97	0.035	0.063	0.082	0.422	0.105	0	0.327	0
	4	5	1	10	3	16	37	0	4	0
	26.8	4.911	0.248	0.147	0.064	0.417	0	0.002	0.380	0
	1	2	4	23	2	16	0	6	4	0

些土壤属性变异的 50% 左右。地形、海拔等环境因子对土壤全 P、全 K、CaCO₃ 含量等有较大影响。海拔、坡度和坡位可以解释全 P 变异的 81%，坡向、坡位和坡度可以解释全 K 变异的 83%，坡向、坡度和地形可以解释 CaCO₃ 含量变异的 70%。

不同土地利用类型及环境因子在土壤生物性质及土壤质量变异(方差)中所占的百分比见表 8。土地利用类型变化对土壤微生物生物量碳和氮、磷酸酶、蔗糖酶及呼吸强度等土壤生物性质有显著影响($P < 0.05$), 可解释其变异的 36% ~ 72%。环境因子中, 坡度对土壤微生物性质的影响较大。

总体上, 土壤理化及生物性质的变异大部分是由土地利用类型变化引起的, 土地利用的变化是土壤质量变异产生的主要来源, 可解释 97% 的土壤质量指数的变异性(表 8)。可见, 土地利用类型的变化是土壤质量变化的主导因子。

3 讨 论

土壤质量变异性是土壤理化和生物属性空间变异的综合体现。目前, 国内外就土壤理化属性的空间变异性研究已有很多, 而且大多针对某些土壤特性展开, 如渗透性^[7]、质地^[3]、结构性^[4]、养分^[16-17]等, 而综合土壤理化和生物属性的土壤质量空间变异研究还较少见。从土壤质量角度探讨土壤属性的空间变异有利于从整体上把握土壤属性的变异特征, 全面了解土壤属性空间变异程度及影响因素。

已有的黄土高原土壤空间变异性研究表明, 县域尺度(4333 km²) 土壤养分空间变异不大, 有机质、全氮和全磷为中等变异性(CV 30% ~ 60%), 小

流域尺度(3.5 km²) 土壤质地和容重的空间差异较小, 属弱变异性; 水稳性团聚体空间变异较大, 稳定入渗率变异最大^[7]。全磷变异较小, 有机质、全氮、有效氮变异较大, 速效磷变异最大^[10, 18]。坡面尺度上土壤渗透性属中等变异性^[19], 有机质、全氮、有效氮、有效磷属于中等变异性, 而全磷属于弱变异性^[20]。

本研究结果表明, 黄土丘陵区域尺度(700 km²) 不同土壤属性的变异性有较大差异。土壤物理属性中的比重、粘粒含量是在成土过程中形成的土壤本质属性, 因此变异很小(CV < 10%), 渗透性和抗冲性是土壤多种性质的综合体现, 与土壤有机质、孔隙度等密切相关^[21], 因此表现出较强的变异性(CV > 100%)。土壤具有较强的缓冲性, 因此在一定的时空尺度内土壤 pH 变异较小(CV < 10%)。土壤全磷和全钾含量主要受母质中矿物成分的影响, 土壤氮素含量主要受植被、气候、土壤质地、地形和地势、耕作利用方式等因素的影响, 因此全磷和全钾的变异较小(CV < 20%), 而全氮和有效氮的变异较大(CV 45% ~ 90%)。土壤生物属性对环境条件的变化反应敏感, 呼吸强度、微生物熵、蔗糖酶、磷酸酶、脲酶等表现出较大的变异性(CV 50% ~ 102%)。以上这些土壤属性变异性与黄土高原已有的研究结果基本一致, 也与国内外其他地区的研究结果相吻合^[22-24]。

土壤属性变异性是多重尺度上气候、地形、土壤母质、土地利用及人为活动等多因子综合作用的结果, 就某一地区而言, 土壤质量变异性存在主控因子^[1]。黄土丘陵区地貌类型多样, 地形破碎, 不同坡

表 9 黄土丘陵区土壤质量指标的敏感性分级

Table 9 Sensibility classification of soil quality indicators in the hilly Loess Plateau region

指标敏感度 Sensitivity	变异系数 CV(%)	土壤属性 Soil attribute
高度敏感 High sensitive	≥100	速效 P、抗冲性、 K_{10} 、活性有机碳、有机质、脲酶 Available P, anti-scorability, infiltration coefficient, labile organic C, organic matter, urease
中度敏感 Middle sensitive	40 ~ 100	微生物生物量 C、微生物生物量 N、磷酸酶、碱解 N、全 N、团聚体平均质量直径、蔗糖酶、团聚体、微生物熵、呼吸强度、呼吸熵、速效 K、阳离子交换量 Microbial biomass C, microbial biomass N, phosphate, available N, total N, MMD, invertase, aggregate, microbial quotient, respiration intensity, respiratory quotient, available K, CEC
低度敏感 Low sensitive	10 ~ 40	全 K、全 P、粘粒、 $CaCO_3$ 、微团聚体平均质量直径 Total K, total P, clay, $CaCO_3$, MICMMD
不敏感 Insensitive	≤10	容重、总孔隙度、过氧化氢酶、毛管孔隙度、结构系数、pH、粉粒、比重 Bulk density, total porosity, catalase, capillary porosity, structure coefficient, pH, silt, specific gravity

向、坡位的水分养分条件有所差异^[16],明确这种复杂地形条件下土壤质量变异性的影响因素及主控因子就显得尤为重要。地形与土壤属性的变异性密切相关^[24]。地形影响水热条件和土壤物质的再分配,因而不同地形部位具有不同的土壤属性。在地形复杂的黄土丘陵区,土壤粘粒、砂粒含量与地形有高度的相关性;同时,地形亦是影响土壤有机质的重要因素,土壤有机质随山坡位置变化而变化^[8]。

土壤质量包括内在质量(inherent quality)和动态质量(dynamic quality)两个方面^[25]。土壤内在质量是自然的、相对稳定的属性,而动态质量则易受人类活动的影响。本研究结果表明,土地利用类型变化是土壤氮素和有机质变异的主要来源($P < 0.01$),受其影响,土地利用类型变化对土壤水稳性团聚体、渗透性、微生物生物量碳和氮、磷酸酶、蔗糖酶及呼吸强度等土壤动态质量指标的变异性亦起主导作用。而对于变异性较小的 $CaCO_3$ 、全磷、全钾、CEC、质地、比重等内在土壤质量指标,其变异性主要来源于地形等环境因子的差异,反映了这些土壤属性对环境因子变化的敏感性。

土壤质量指标变异性是土壤属性环境敏感性的反映。用土壤质量指标的变异系数作为指标敏感性判断依据(表 9),可对黄土丘陵区土壤质量指标的敏感性进行分级,其中速效磷、抗冲性、 K_{10} 、活性有机碳、有机质、脲酶作为土壤质量评价的高度敏感指标,是土壤质量恢复与调控的主要目标。土壤生物指标属于高度敏感和中度敏感指标,反映了以土壤生物指标作为土壤质量评价指标的巨大潜力。但土壤质量评价指标并非越灵敏越好,如果过于灵敏反而不利于评价土壤质量和制定相应的土壤保育措施。在定量评价黄土丘陵区土壤质量时,可以选择高度和中度敏感指标。

4 结 论

土壤 pH、微团聚体、结构系数、粉粒、比重、容重、总孔隙度、毛管孔隙度及过氧化氢酶变异性很小,为弱变异性。土壤养分、 $CaCO_3$ 、CEC、粘粒、微团聚体平均质量直径、水稳性团聚体、团聚体平均质量直径及生物指标呼吸强度、微生物熵、蔗糖酶、磷酸酶、呼吸熵、微生物生物量碳和氮的变异性较小,为中等变异性。土壤活性有机碳和有效磷、抗冲性、渗透系数及脲酶的变异性最大,为强变异性。

土壤理化及生物属性的变异大部分由土地利用类型的变化引起,土地利用类型变化是土壤质量变异性产生的主要来源,可解释 97% 的土壤质量指数的变异性。因此,土地利用类型的变化是黄土丘陵区土壤质量变异的主导因子。

土地利用类型变化对土壤有机质、氮含量、水稳性团聚体、渗透性、微生物生物量碳和氮、磷酸酶、蔗糖酶及呼吸强度等土壤动态质量指标的变异性起主导作用。而变异性较小的 $CaCO_3$ 、全磷、全钾、CEC、质地、比重等内在土壤质量指标的变异性主要来源于地形等环境因子的差异。

参考文献

- [1] Qiu Y (丘扬), Wang Y (王勇), Fu B-J (傅伯杰). Spatiotemporal variation in soil quality and its relation to the environmental factors. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2008, 27(4): 42 - 50 (in Chinese)
- [2] Zhou H-Z (周慧珍), Gong Z-T (龚子同). Research on soil spatial variability. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1996, 33(3): 232 - 240 (in Chinese)
- [3] Gao J (高峻), Huang Y-F (黄元仿), Li B-G (李保国), et al. Spatial variability analysis of soil particle compositions and soil profile horizon in field. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报),

- 2003, **9**(2): 151–157 (in Chinese)
- [4] Sarah P, Rodeh Y. Soil structure variations under manipulations of water and vegetation. *Journal of Arid Environments*, 2004, **58**: 43–57
- [5] Udawatta RP, Kremer RJ, Adamson BW, et al. Variations in soil aggregate stability and enzyme activities in a temperate agroforestry practice. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**: 153–160
- [6] Schmalz B, Lennartz B. Analyses of soil water content variations and GPR attribute distributions. *Journal of Hydrology*, 2002, **267**: 217–226
- [7] Qiu Y (邱扬), Fu B-J (傅伯杰), Wang J (王军), et al. Variability of the soil physical properties on the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2002, **57**(5): 587–594 (in Chinese)
- [8] Liu XM, Zhang WW, Zhang MH, et al. Spatio-temporal variations of soil nutrients influenced by an altered land tenure system in China. *Geoderma*, 2009, **152**: 23–34
- [9] Stenger R, Priesack E, Beese F. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scale. *Geoderma*, 2002, **105**: 259–275
- [10] Lian G (连纲), Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(3): 946–954 (in Chinese)
- [11] Yao R-J (姚荣江), Yang J-S (杨劲松), Liu G-M (刘广明), et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(6): 61–66 (in Chinese)
- [12] Huang Y-F (黄元仿), Zhou Z-Y (周志宇), Yuan X-Y (苑小勇), et al. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(12): 2776–2781 (in Chinese)
- [13] Bao S-T (包世泰), Zhao H-B (赵寒冰), Hu Y-M (胡月明), et al. Spatial variability of soil organic matter and relation with natural quality of farm land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(8): 95–101 (in Chinese)
- [14] Xu M-X (许明祥), Liu G-B (刘国彬), Zhao Y-G (赵允格). Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(3): 285–293 (in Chinese)
- [15] Lei Z-D (雷志栋), Yang S-X (杨诗秀), Xie S-C (谢森传). *Soil Water Dynamics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 (in Chinese)
- [16] Lian G (连纲), Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients on a county scale on the Loess Plateau – A case study of Hengshan County, Shaanxi Province. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(4): 577–584 (in Chinese)
- [17] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, et al. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites – Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, **141**: 272–282
- [18] Qiu Y (邱扬), Fu B-J (傅伯杰), Wang J (王军), et al. Spatiotemporal variability of soil nutrients and its influencing factors in small watershed on the Loess Plateau. *Progress in Natural Science* (自然科学进展), 2004, **14**(3): 294–299 (in Chinese)
- [19] Jiang N (姜娜), Shao M-A (邵明安), Lei T-W (雷廷武), et al. Spatial variability of soil infiltration properties on natural slope in Liudaogou catchment on Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(1): 14–17 (in Chinese)
- [20] Pan C-Z (潘成忠), Shangguan Z-P (上官周平). Spatial variability of soil moisture, nutrients and productivity on slopeland in loessial semiarid region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(11): 2061–2066 (in Chinese)
- [21] Hu W-Y (胡维银), Liu G-B (刘国彬), Xu M-X (许明祥). Dynamic of soil anti-scourability on slope cropland in loess hilly region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2000, **20**(3): 26–28 (in Chinese)
- [22] Tang G-Y (唐国勇), Su Y-R (苏以荣), Xiao H-A (肖和艾), et al. Spatial variation in organic carbon, nutrients and microbial biomass contents of paddy soils in hilly red soil region. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(1): 15–21 (in Chinese)
- [23] Yue Y-M (岳跃民), Wang K-L (王克林), Zhang W (张伟), et al. Relationships between soil and environment in peak-cluster depression areas of Karst region based on canonical correspondence analysis. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29**(5): 1400–1405 (in Chinese)
- [24] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south-eastern highlands of Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 2006, **232**: 90–99
- [25] Doran JW, Parkin TB. Defining and assessing soil quality // Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, eds. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, Wisconsin, USA: SSSA Special Publication, 1994: 3–21

作者简介 许明祥,男,1972年生,博士,副研究员.主要从事侵蚀环境土壤质量演变及土壤-植被互动效应研究. E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

责任编辑 张凤丽