

黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价

马芊红^{1,2}, 张光辉^{1,2}, 耿 韧³, 王 兵⁴

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 3. 南京水利科学研究院, 南京 210029;

4. 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)

摘 要: 为了认识和评价黄土高原地区小流域不同土地利用类型下的土壤质量, 以陕西省安塞县纸坊沟为例, 选取了 26 个采样点, 分属林地、灌木地、草地、农地、果园、苗圃和撂荒地 7 种土地利用类型, 利用主成分分析法从 16 项土壤理化指标中选取关键指标, 计算了土壤质量指数。结果表明: (1) 容重、黏粒含量、微团聚体平均质量直径(MICMWD)、有机质和 pH 值是表征纸坊沟流域土壤质量的关键指标, 除容重外, 其余 4 个关键指标的隶属度在研究区不同土地利用间均存在显著差异; (2) 与地形因子相比, 土地利用方式对纸坊沟流域土壤质量的影响更大; (3) 整体上纸坊沟流域土壤质量处于较高水平(0.71 ± 0.10), 不同土地利用方式下土壤质量存在显著差异, 土壤质量指数均值从大到小依次为林地>灌木地>苗圃>草地>果园>农地>撂荒地。研究结果可为黄土丘陵区小流域土地利用方式的合理布局和土壤质量的定向培育提供重要依据。

关键词: 土壤质量; 土地利用; 主成分分析; 关键指标; 纸坊沟流域; 黄土高原

中图分类号: F301.24; S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0030-06

Evaluation on Soil Quality of Different Land Use Types in Zhifanggou Watershed of the Loess Plateau

MA Qianhong^{1,2}, ZHANG Guanghui^{1,2}, GENG Ren³, WANG Bing⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to have a distinct understanding and proper evaluation of the soil quality under different land use types in small watershed, we collected 26 soil samples from seven different land use types, i. e., forestland, shrub land, grassland, farmland, orchard, nursery and abandoned land in Zhifanggou Watershed, and selected several key indicators from 16 soil physical and chemical indicators to calculate soil quality index (SQI). The results showed that: (1) the selected key indicators were bulk density, clay content, MICMWD, soil organic matter and pH value, except bulk density, the membership values of the other four key indicators differed significantly among land use types; (2) compared with terrain factors, land use type was the more important factor affecting soil quality in Zhifanggou Watershed; (3) as a whole, the soil quality of Zhifanggou Watershed ranked as higher level (0.71 ± 0.10), and soil quality indexes among land use types were significantly different. The average soil quality index decreased in the order: forestland>shrubs land>nursery>grassland>orchard>farmland>abandoned land. The results of the study are of great significance for distributing land use types rationally and improving soil quality directionally in small watersheds of the Loess Plateau region.

Keywords: soil quality; land use; principal component analysis; key indicators; Zhifanggou Watershed; the Loess Plateau

土壤质量是影响陆地生态系统持续健康发展的重要因素,土地利用方式作为可直接作用于土壤的关键因素之一,普遍而深刻地影响着土壤质量^[1]。不同土地利用类型间必然存在地表覆被、土壤结构、物质循环、土壤微生物活动等一系列土壤理化性状和生态过程的差异。土地利用对土壤质量的影响具有方向性,因地制宜的土地利用方式可以改良土壤理化性状,促进水、肥、气、热因子相互协调;相反不适宜的土地利用方式会加剧土壤侵蚀,打破土壤系统动态平衡,降低土壤生态功能和生产功能^[2]。

20世纪90年代以来,土地利用与管理措施对土壤质量的影响的研究已成为土壤质量研究领域的热点^[2-5]。张汪寿等^[6]利用土壤质量指数法计算了北京郊区7种土地利用方式下的土壤质量,发现土壤质量从低到高依次为草地、荒地、林地、果园、菜地、农田、湿地。王雪梅等^[7]的研究结果表明在渭干河一库车三角州绿洲地区各土地利用方式间土壤质量存在显著差异,其中林地土壤质量最高,其次为耕地、荒漠灌丛,而盐碱草地的土壤质量最低。郭旭东等^[8]在河北省遵化市低山丘陵区的研究结果显示林地或草地开垦为板栗园或耕地后土壤质量发生了严重退化。黄土高原地区突出的人地矛盾加剧了生态环境的脆弱性和风险性,土壤质量对维系该地区生态环境和农业可持续发展至关重要。“退耕还林还草”工程的实施和以小流域为单元的水土流失综合治理使黄土高原地区的生态环境和土壤质量得到了有效改善,但目前对黄土高原典型小流域土壤质量整体状况和不同土地利用方式间土壤质量的差异缺乏系统认识。本文选取陕西省安塞县纸坊沟流域为研究区,对比分析该流域典型土地利用方式下土壤理化性质及土壤质量差异,从而为同类小流域以及黄土高原地区土地利用方式的优化配置,土壤质量的维系与改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

纸坊沟流域(东经 109°13'—109°16',北纬 36°42'—36°46')位于陕西省延安市安塞县沿河湾镇,面积约 8.27 km²,是国家级退耕还林还草示范区,同时也是黄土高原水土流失综合治理典型小流域。该流域地处黄土高原丘陵沟壑区第二副区,地表崎岖,支离破碎,年均温为 8.8℃,年均降雨量约 549 mm,降雨年际和季节变化大,黄绵土为主要的土壤类型^[9]。研究区主要的土地利用类型为林地、灌木地、草地、农地、果园、苗圃、撂荒地等。夏季植被覆盖较高,以人工栽种的植被类型为主,如刺槐、小叶杨、柠条、沙棘、沙打

旺等,玉米、谷子、马铃薯等为主的农作物。

1.2 样品采集与分析

经过充分的野外调查,参考许明祥等^[10]2001年在纸坊沟流域野外试验的采样点信息,在流域内共布设了26个采样点,分属林地、灌木地、草地、农地、果园、苗圃、撂荒地7种典型的土地利用类型(表1)。由于苗圃在纸坊沟流域的分布面积较小,因此布设了2个采样点,其余6种土地利用类型分布较为广泛,各布设了4个采样点。采样时间为2016年5月,以地块为采样单元,到达采样点后,利用手持GPS获取采样点经纬度信息,使用地质罗盘测定采样点坡度、坡向,观察记录采样点主要植被类型并目估盖度或郁闭度。去除地表枯落物等杂质后,利用“S”形5点采样法,采集表层0—20 cm土样,将分样混合均匀后用四分法留取1 kg左右土样装袋,带回室内备用^[11]。

测定土壤理化指标时对供测土样颗粒大小有不同的要求,因此将野外采集的土样经风干、研磨后,分别过2 mm,1 mm和0.15 mm孔径的筛子后装袋保存。容重测定采用环刀法,比重测定采用比重瓶法,总孔隙度根据容重和比重计算得到[总孔隙度=(1-容重/比重)×100%]。采用马尔文法(所用仪器为Mastersizer 2000激光粒度仪)测定土壤质地和微团聚体含量,根据美国制标准确定各级粒径。微团聚体平均质量直径(MICMWD)和结构系数能够间接反映微团聚体稳定性和土壤抗蚀性,两者均与微团聚体水稳性和土壤抗蚀能力成正比,采用许明祥等^[10]的方法计算这两个参数。有机质测定采用重铬酸钾容量法,全氮采用半微量凯氏定氮法,全磷采用NaOH熔融钼锑抗比色法,全钾采用NaOH熔融分光光度法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用NaHCO₃浸提钼锑抗比色法,速效钾采用NH₄AOc浸提火焰光度法,pH值采用2.5:1水土比浸提电位法^[12],除土壤容重外(9个重复),其余指标均重复测量2次。

1.3 数据处理

土壤理化指标测定值的存储和预处理以及指标隶属度值和土壤质量指数的计算均在Excel 2010中完成,在ArcMap 10.2和Origin 8.5中绘制采样点分布图 and 不同土地利用类型土壤质量指数对比图,在SPSS 18.0中根据不同研究目标对数据进行统计分析,包括描述性统计分析、非参数检验、相关分析、主成分分析、一般线性模型方差成分估计和单因素方差分析等。

2 结果与分析

2.1 土壤理化指标统计特征

为了全面准确地反映纸坊沟流域不同土地利用类型

下的土壤性状,本文分别测定各采样点的土壤容重、孔隙度、黏粒含量、砂粒含量、物理性黏粒含量、微团聚体含量、MICMWD、结构系数、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾和 pH 值 16 项土壤理化指标(表 2)。

表 1 采样点基本信息

| 编号 | 土地利用类型 | 纬度(N) | 经度(E) | 海拔/m | 坡度/(°) | 坡向 | 植被类型 | 盖度、郁闭度/% |
|----|--------|-----------|------------|--------|--------|-------|---------|----------|
| 1 | 农地 | 36°46′12″ | 109°15′56″ | 1046.2 | 0 | 无 | 玉米 | 5 |
| 2 | 苗圃 | 36°46′08″ | 109°15′50″ | 1046.0 | 0 | 无 | 松树苗 | 80 |
| 3 | 草地 | 36°46′06″ | 109°15′22″ | 1219.5 | 8.5 | ES144 | 长茅草、白羊草 | 80 |
| 4 | 林地 | 36°45′58″ | 109°15′41″ | 1121.1 | 27 | EN43 | 榆树 | 70 |
| 5 | 农地 | 36°45′36″ | 109°14′56″ | 1272.0 | 0 | 无 | 玉米 | 5 |
| 6 | 灌木地 | 36°45′35″ | 109°16′00″ | 1254.2 | 24 | WN286 | 柠条 | 90 |
| 7 | 林地 | 36°45′29″ | 109°15′54″ | 1208.4 | 12 | WN339 | 刺槐 | 95 |
| 8 | 撂荒地 | 36°45′24″ | 109°15′30″ | 1085.5 | 0 | 无 | 长茅草、莎草 | 60 |
| 9 | 林地 | 36°45′15″ | 109°14′47″ | 1257.1 | 29 | ES120 | 刺槐 | 70 |
| 10 | 撂荒地 | 36°45′05″ | 109°15′42″ | 1271.8 | 0 | 无 | 长茅草、茵陈蒿 | 70 |
| 11 | 果园 | 36°45′02″ | 109°14′44″ | 1256.6 | 0 | 无 | 苹果 | 30 |
| 12 | 农田 | 36°44′44″ | 109°15′05″ | 1120.3 | 0 | 无 | 玉米 | 5 |
| 13 | 灌木地 | 36°43′37″ | 109°15′37″ | 1245.5 | 3 | W270 | 柠条 | 85 |
| 14 | 林地 | 36°44′22″ | 109°15′36″ | 1239.8 | 18 | WS252 | 刺槐 | 70 |
| 15 | 果园 | 36°44′33″ | 109°14′46″ | 1185.2 | 0 | 无 | 苹果 | 40 |
| 16 | 草地 | 36°44′25″ | 109°15′28″ | 1196.2 | 12 | WS246 | 沙打旺、茵陈蒿 | 90 |
| 17 | 果园 | 36°44′23″ | 109°15′02″ | 1195.7 | 0 | 无 | 苹果 | 25 |
| 18 | 苗圃 | 36°44′23″ | 109°15′25″ | 1174.6 | 0 | 无 | 柳树苗 | 90 |
| 19 | 果园 | 36°44′18″ | 109°15′09″ | 1246.4 | 0 | 无 | 苹果 | 20 |
| 20 | 农地 | 36°44′17″ | 109°15′27″ | 1177.8 | 3 | EN81 | 玉米 | 5 |
| 21 | 撂荒地 | 36°44′14″ | 109°14′44″ | 1176.2 | 0 | 无 | 长茅草、茵陈蒿 | 85 |
| 22 | 灌木地 | 36°44′29″ | 109°15′40″ | 1276.1 | 22 | WS269 | 柠条 | 85 |
| 23 | 草地 | 36°43′48″ | 109°15′30″ | 1198.2 | 10 | WS259 | 莎草、铁杆蒿 | 85 |
| 24 | 撂荒地 | 36°44′32″ | 109°15′31″ | 1203.2 | 0 | 无 | 莎草、茵陈蒿 | 50 |
| 25 | 草地 | 36°43′17″ | 109°14′42″ | 1401.0 | 10 | WN322 | 长茅草、沙打旺 | 80 |
| 26 | 灌木地 | 36°43′27″ | 109°14′52″ | 1358.3 | 12 | EN56 | 柠条 | 85 |

表 2 土壤理化指标统计特征

| 土壤属性 | 最小值 | 最大值 | 均值 | 标准差 | 变异系数/% | 偏度 | 峰度 |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 容重/(g·cm ⁻³) | 0.90 | 1.33 | 1.10 | 0.11 | 9.84 | 0.10 | -0.29 |
| 总孔隙度/% | 51.20 | 66.69 | 59.40 | 3.98 | 6.70 | -0.05 | -0.45 |
| 黏粒含量/% | 7.62 | 21.91 | 11.72 | 2.82 | 24.06 | 1.87 | 6.03 |
| 砂粒含量/% | 12.26 | 41.71 | 30.29 | 6.45 | 21.29 | -0.71 | 1.06 |
| 物理性黏粒含量/% | 14.11 | 39.52 | 20.89 | 4.88 | 23.35 | 2.27 | 7.99 |
| 微团聚体含量/% | 84.00 | 99.14 | 94.12 | 3.52 | 3.74 | -1.59 | 2.81 |
| MICMWD/mm | 0.06 | 0.09 | 0.07 | 0.01 | 7.37 | 0.53 | 1.04 |
| 结构系数/% | 31.02 | 63.20 | 46.44 | 7.10 | 15.30 | 0.31 | 0.52 |
| 有机质/(g·kg ⁻¹) | 6.35 | 39.72 | 13.66 | 7.52 | 55.08 | 1.98 | 4.75 |
| 全氮/(g·kg ⁻¹) | 0.39 | 2.10 | 0.80 | 0.37 | 45.66 | 1.94 | 5.20 |
| 全磷/(g·kg ⁻¹) | 0.60 | 0.79 | 0.67 | 0.05 | 7.36 | 0.82 | 0.61 |
| 全钾/(g·kg ⁻¹) | 16.54 | 18.29 | 17.27 | 0.44 | 2.55 | 0.18 | -0.34 |
| 碱解氮/(mg·kg ⁻¹) | 18.07 | 151.23 | 52.04 | 30.29 | 58.20 | 1.58 | 3.20 |
| 速效磷/(mg·kg ⁻¹) | 1.83 | 55.83 | 11.84 | 15.38 | 129.87 | 1.99 | 2.93 |
| 速效钾/(mg·kg ⁻¹) | 84.90 | 578.73 | 199.20 | 106.33 | 53.38 | 1.90 | 5.41 |
| pH 值 | 8.21 | 8.72 | 8.51 | 0.13 | 1.56 | -0.15 | -0.48 |

结果表明,整体而言纸坊沟流域土壤容重与总孔隙度适宜,土壤容重均值为 (1.10 ± 0.11) g/cm³,总孔隙度均值为 $59.40\%\pm3.98\%$ 。从黏粒含量和砂粒含量均值来看,该流域土壤质地类型为耕性良好的粉壤土,与许明祥等^[10]结果相比,本文中黏粒含量较低,而砂粒含量较高,这可能是由于测定土壤质地时许明祥等^[10]采用传统的吸管法,而本文选用马尔文法,该方法可能存在黏粒测定值偏低的弊端。依据全国第二次土壤普查养分分级标准,纸坊沟流域 26 个采样点的土壤速效钾含量为高水平,全钾、全磷和速效磷为中上等水平,有机质和全氮为中下等水平,碱解氮含量为低水平,速效钾与全钾含量较高主要是由于该地区黄土矿物长石、云母及主要黏土矿物高岭石、伊利石中钾含量明显高于其他地区^[13]。除全钾含量基本相同外,本文中有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量均高于许明祥等^[10]的研究结果,说明从 2001—2016 年纸坊沟流域土壤肥力质量得到了显著改善。该流域土壤碱性较强,pH 值均值为 8.51 ± 0.13 。16 个指标中,速效磷的变异系数最大(129.9%),不同土地利用类型间速效磷含量差异显著,农地、果园的速效磷含量显著高于撂荒地和草地($p<0.05$),说明速效磷含量受人类施肥活动的影响最大。pH 值和全钾的变异系数最小,仅为 1.6%和 2.6%,气候和成土母质作为影响 pH 值与全钾含量的主要因素,在小流域尺度上变化较小。除速效磷为强变异指标外,其余指标均为中等变异指标或弱变异指标,这主要是由于研究区面积较小,黄土母质较为均一,绝大部分土壤理化性质差别不大。非参数 K-S 检验表明,除速效磷为对数正态分布外,其余 15

项指标均符合正态分布。

2.2 单因素土壤质量评价

2.2.1 选取关键指标 相关分析表明,16 项土壤理化指标间存在严重的共线性,因此可以采用主成分分析法从中选取若干关键指标来表征纸坊沟流域不同土地利用方式下的土壤质量。主成分分析结果表明,前 4 个主成分的特征值均大于 1,累积方差贡献率超过 80%,因此本文选取前 4 个主成分。根据各指标在主成分上旋转因子载荷大小及指标间的相关关系,确定土壤质量评价关键指标。

第 1 个主成分(PC₁)上,有机质、全氮、碱解氮和速效钾的旋转因子载荷均大于 0.9(表 3),有机质是土壤中氮、磷、钾等养分元素的重要来源,全氮、碱解氮和速效钾均与有机质呈极显著正相关,相关系数大于 0.85,因此,首先将有机质列为关键指标之一。pH 值在 PC₁ 上旋转因子载荷绝对值大于 0.6,且与有机质相关关系较弱,pH 值可列入关键指标。黏粒含量、砂粒含量和物理性黏粒含量在第 2 个主成分(PC₂)上旋转因子载荷绝对值均大于 0.9,黏粒是土壤活力的中心,与砂粒和物理性黏粒相关程度极高,据此黏粒含量可入选关键指标。第 3 个主成分(PC₃)上,容重与总孔隙度的旋转因子载荷绝对值最高,且两者负相关关系极显著,选取容重作为关键指标之一。第 4 个主成分(PC₄)上,旋转因子载荷绝对值最大的为 MICMWD,且 MICMWD 与旋转因子载荷较大的速效磷和全钾均呈极显著负相关,因此将 MICMWD 作为 PC₄ 的代表指标。综上所述,本文选取容重、黏粒含量、MICMWD、有机质和 pH 值作为评价纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量的关键指标。

表 3 土壤指标在各主成分上的旋转因子载荷

| 指标 | PC ₁ | PC ₂ | PC ₃ | PC ₄ | 指标 | PC ₁ | PC ₂ | PC ₃ | PC ₄ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 全氮 | 0.96 | 0.20 | 0.04 | -0.13 | 容重 | -0.07 | 0.14 | 0.96 | 0.02 |
| 有机质 | 0.93 | 0.23 | 0.01 | -0.16 | 总孔隙度 | 0.00 | -0.15 | -0.96 | 0.00 |
| 速效钾 | 0.92 | 0.15 | 0.03 | 0.14 | MICMWD | 0.37 | 0.03 | -0.02 | -0.85 |
| 碱解氮 | 0.92 | 0.14 | 0.08 | -0.19 | 速效磷 | 0.12 | -0.48 | -0.07 | 0.75 |
| pH 值 | -0.67 | 0.13 | 0.08 | -0.48 | 全钾 | -0.02 | 0.37 | 0.18 | 0.74 |
| 砂粒含量 | -0.20 | -0.95 | -0.09 | 0.11 | 微团聚体含量 | -0.56 | -0.27 | 0.50 | -0.04 |
| 物理性黏粒含量 | 0.10 | 0.94 | 0.01 | 0.08 | 全磷 | 0.36 | -0.22 | 0.54 | 0.48 |
| 黏粒含量 | 0.11 | 0.94 | -0.03 | -0.01 | 结构系数 | 0.16 | 0.46 | 0.42 | 0.20 |

2.2.2 计算指标隶属度 由于土壤理化指标的量纲和量级各不相同,无法直接放到一起计算土壤质量指数,另外土壤质量指标的优劣以及其对土壤功能的影响具有渐变性,因此采用模糊数学中的隶属度函数计算各指标的隶属度值^[10]。根据许明祥等^[10]在黄土高原安塞县的相关研究,MICMWD 和有机质适用于“S”型隶属度函数(公式 1),其上临界值(x_0)分别为 0.07 mm 和 41.5

g/kg,容重、黏粒含量和 pH 值采用抛物线型隶属度函数标准化(公式 2),临界值见表 4。

表 4 抛物线型隶属度函数评价指标转折点取值

| 评价指标 | a_1 | b_1 | b_2 | a_2 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 容重/(g·cm ⁻³) | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 1.8 |
| 黏粒含量/% | 0 | 15 | 25 | 100 |
| pH 值 | 4 | 7 | 8.5 | 9.5 |

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

$$K_i = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1} & a_1 < x < b_1 \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2} & b_2 < x < a_2 \\ 1 & b_1 \leq x \leq b_2 \end{cases} \quad (2)$$

对各指标隶属度值的方差分析结果表明(表 5),纸坊沟流域容重隶属度值在不同的土地利用类型间差异不显著。从土壤质地来看,农地和果园的黏粒含量隶属度显著低于苗圃、林地、灌木地和撂荒地,这主要是由于人类耕作活动使耕地和果园表土疏松,冬春季节地表裸露,细颗粒物更易被侵蚀。林地、灌木地、草地的 MICMWD 隶属度明显高于果园和苗圃,说明这 3 种土地利用方式下的土壤微团聚体稳定性较好。林地的有机质隶属度显著高于其他土地利用类型,这与郭旭东等^[8]在河北遵化低山丘陵区所得研究结果相同。这主要是由于林地枯落物丰富,土壤生物种类与数量较多,

利于有机质富集和养分循环。相反,撂荒地的有机质隶属度值为 7 种土地利用类型中的最低值,说明养分含量较低是制约纸坊沟流域撂荒地土壤质量最主要的原因。与林地、灌木地、草地相比,撂荒地生物量较小,枯落物补给较少,同时无人培肥活动,因此养分含量较低。另外,撂荒地的 pH 值高达 8.69,土壤呈偏碱性,在一定程度上抑制了土壤生物活动和养分循环。

地形对土壤和植被的影响不容忽视,为了对比土地利用类型和地形因子(海拔、坡度、坡位、坡向)对土壤质量指标变异性的影响程度,通过一般线性模型方差成分估计模块计算得到各因子对评价指标隶属度总方差的贡献率(表 6)。结果表明,土地利用对容重、黏粒含量、MICMWD、有机质和 pH 值总方差的贡献率均高于地形因子,其中土地利用可解释黏粒含量和 pH 值总方差的 60% 以上。由此可见,在纸坊沟流域土地利用类型对土壤质量评价关键指标的影响高于地形因子。郭旭东等^[8]的研究结果同样表明土地利用是影响河北遵化低山丘陵区土壤容重和土壤养分含量最重要的因素。

表 5 不同土地利用类型下各评价指标隶属度

| 指标 | 林地 | 灌木地 | 草地 | 农地 | 果园 | 苗圃 | 撂荒地 |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 容重 | 0.95 | 1.00 | 0.97 | 0.94 | 0.97 | 0.90 | 0.84 |
| 黏粒含量 | 0.89ab | 0.81abc | 0.74cd | 0.62d | 0.63d | 0.95a | 0.80bc |
| MICMWD | 0.98a | 1.00a | 0.98a | 0.93ab | 0.91b | 0.91b | 0.96ab |
| 有机质 | 0.63a | 0.43b | 0.28bc | 0.21c | 0.26bc | 0.26bc | 0.19c |
| pH 值 | 0.99a | 0.99a | 0.91ab | 0.94a | 1.00a | 0.91ab | 0.82b |

注:表中数值后所带小写字母表示关键指标隶属度在不同土地利用间存在显著差异($p < 0.05$)。

表 6 土地利用及地形因子在土壤评价指标隶属度方差中所占的百分比

| 指标 | 土地利用 | 海拔 | 坡度 | 坡位 | 坡向 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 容重 | 0.038(39.6%) | 0.023(23.9%) | 0.009(9.4%) | 0.020(20.8%) | 0.006(6.3%) |
| 黏粒含量 | 0.161(74.9%) | 0.003(1.4%) | 0.018(8.4%) | 0.003(1.4%) | 0.030(13.9%) |
| MICMWD | 0.009(37.5%) | 0.005(20.8%) | 0.000(0.0%) | 0.003(12.5%) | 0.007(29.2%) |
| 有机质 | 0.134(49.7%) | 0.022(8.3%) | 0.056(20.8%) | 0.004(1.7%) | 0.053(18.5%) |
| pH 值 | 0.070(63.5%) | 0.009(8.0%) | 0.002(1.7%) | 0.028(25.8%) | 0.001(1.0%) |

注:表中小括号内的百分数代表土地利用或地形因子在土壤质量指标隶属度方差变异中所占比例。

2.3 土壤质量综合评价

2.3.1 综合评价方法 权重系数可以定量的表示各指标在土壤质量综合评价中的贡献率^[14],为了保证权重系数的准确性和客观性,本文将主成分分析所得各指标公因子方差占公因子方差总和的比例作为权重。容重、黏粒含量、MICMWD、有机质和 pH 值的权重系数分别为 0.17、0.15、0.22、0.22、0.24。土壤系统是一个密不可分的整体,为了更好地体现土壤质量指标间的交互作用,本文选用加权综合法计算各采样点的土壤质量指数(SQI),计算公式如下:

$$SQI = \prod_{i=1}^n (K_i)^{w_i} \quad (3)$$

式中: K_i 是第 i 个指标的隶属度值; w_i 是第 i 个指标的权重; n 是评价指标的个数,本文中 $n=5$,各采样点的土壤质量指数均介于 0~1。

2.3.2 土壤质量指数 26 个采样点的土壤质量指数介于 0.56~0.94,均值为 0.71 ± 0.10 ,变异系数为 14.0%。一般线性模型方差分量分析结果表明土地利用因素可以解释土壤质量指数总方差的 66.0%,远高于其他地形因子,说明土地利用方式是影响纸坊沟流域土壤质量最重要的因素。不同土地利用类型

间土壤质量差异极显著($p < 0.01$),土壤质量指数均值从大到小依次为林地(0.87 ± 0.06) > 灌木地(0.80 ± 0.05) > 苗圃(0.69 ± 0.04) > 草地(0.69 ± 0.08) > 果园(0.69 ± 0.02) > 农地(0.63 ± 0.03) > 撂荒地(0.61 ± 0.05)(图1)。该结论与许明祥等^[10]的研究结果基本一致,不同之处在于许明祥等^[10]的研究结果认为农地和果园的土壤质量低于撂荒地,这可能是由于本试验采样时间为5月份,正值作物和果树追肥时节,土壤养分含量较高,而许明祥等^[10]的采样时间为8—9月,土壤中的养分通过作物根系转移到了成熟的作物中。与尹刚强等^[15]在湘中丘陵区的研究结果不同之处在于,尹刚强等^[15]认为苗圃地的土壤质量最低,这可能是由于湘中地区苗圃地中主要栽种马尾松、油茶、柑橘等树种,土壤酸性很强,养分含量很低,从而制约了苗圃地的土壤质量。

纸坊沟流域林地土壤通气性、透水性良好,枯落物最多,有机质含量高,微生态环境(如光照、地表温度、微生物等)良好^[15],因而林地土壤质量明显高于苗圃、草地、果园、农地和撂荒地。该结论与许明祥^[10]、巩杰^[16]等的研究结果一致。灌木地土壤质量略低于林地,与林地差异不显著,灌丛可有效地拦蓄水土、改善土壤肥力,在坡面上具有“肥力岛屿”的作用^[16]。苗圃、果园与草地的土壤质量同处于较高水平,这主要是由于农民对果园和苗圃施肥较多,草地上和地下生物量较大。农地和撂荒地的土壤质量最低,种植粮食作物的经济效益低于果树,因此当地农民对耕地的投入相对较少,且农地冬季缺少植被保护,易遭受土壤侵蚀,导致农地土壤质量在纸坊沟流域相对较低;撂荒地表层硬壳化现象普遍,养分含量低,土壤呈偏碱性,不利于植被的演替和土壤生物活动,因此在黄土高原实施“退耕还林还草”过程中,应将农地天然撂荒与人工种植林灌草相结合^[16],因地制宜,合理布局,逐步提高土壤质量,改善区域生态环境。

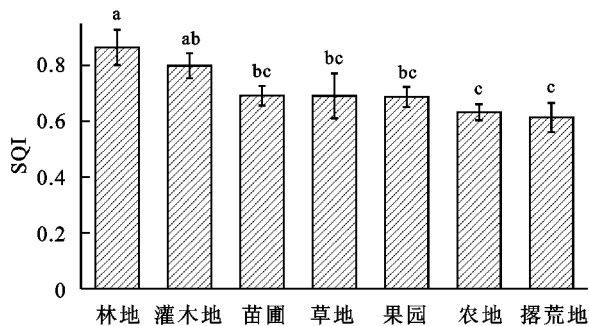


图1 不同土地利用类型土壤质量指数对比

为了更直观地对比各采样点的土壤质量,以0.2为组距将土壤质量指数分为5个等级,分别为低($0 < SQI \leq 0.2$)、较低($0.2 < SQI \leq 0.4$)、中($0.4 < SQI \leq$

0.6)、较高($0.6 < SQI \leq 0.8$)、高($0.8 < SQI < 1$)^[10]。26个采样点土壤质量指数均为中等及以上水平,其中2个采样点属于中等水平(均为撂荒地),7个采样点为高水平(以林地和灌木地为主),其余采样点均为较高水平。从总体上来看,纸坊沟流域不同土地利用类型的土壤质量指数均值为 0.71 ± 0.10 ,属较高水平,高于许明祥等^[10]2001年在安塞县的研究结果(均值为 0.36 ± 0.13),这表明经过15年的植被恢复和生态重建,纸坊沟流域的土壤质量有了明显的改善。

3 结论

(1) 结合主成分分析和相关分析选取的关键指标为容重、黏粒含量、MICMWD、有机质和pH值,农地和果园的黏粒隶属度显著偏低,林地、灌木地、草地的MICMWD隶属度显著高于果园和苗圃,林地有机质隶属度显著高于其他土地利用类型,撂荒地的pH值隶属度为7种土地利用类型中的最低值。

(2) 土地利用类型在关键指标隶属度和土壤质量指数总方差中所占比例大于地形因子,是影响纸坊沟流域土壤质量最重要的因素。

(3) 整体而言,纸坊沟流域土壤质量指数均值为 0.71 ± 0.10 ,属于较高水平,不同土地利用类型间土壤质量存在显著差异,土壤质量指数均值从大到小依次为林地 > 灌木地 > 苗圃 > 草地 > 果园 > 农地 > 撂荒地。

总之,容重、黏粒含量、MICMWD、有机质和pH值5项关键指标能够客观准确地反映纸坊沟流域不同土地利用类型的土壤质量。该流域土壤质量整体状况良好,林地和灌木地土壤质量较高,而农地和撂荒地土壤质量相对较低,由此可见,“退耕还林还草”工程在改善黄土高原小流域生态环境和提高土壤质量中发挥着重要作用。

参考文献:

- [1] 谢瑾,李朝丽,李永梅,等.纳板河流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].应用生态学报,2011,22(12):3169-3176.
- [2] 胡江玲,张高,赵枫,等.新疆精河流域不同土地利用方式对土壤质量的影响[J].水土保持研究,2010,17(4):92-95,99.
- [3] Gong L, Ran Q, He G, et al. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China [J]. Soil and Tillage Research, 2015,146:223-229.
- [4] Moges A, Dagnachew M, Yimer F. Land use effects on soil quality indicators: a case study of abo-wonsho southern Ethiopia[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2013,2013(1A):1-9.

- tance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158:1-9.
- [4] Luna L, Miralles I, Andrenelli M C, et al. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region[J]. *Catena*, 2016, 143(8):256-264.
- [5] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5):228-231.
- [6] 宋日, 刘利, 吴春胜, 等. 东北松嫩草原土壤开垦对有机质含量及土壤结构的影响[J]. *中国草地学报*, 2009, 31(4):91-95.
- [7] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2):263-269.
- [8] 廖雅萍, 王军厚, 付蓉. 川西北阿坝地区沙化土地动态变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3):51-54.
- [9] Hu G, Dong Z, Lu J, et al. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2015, 19:275-281.
- [10] 胡玉福, 彭佳佳, 邓良基, 等. 围栏种植红柳对川西北高寒沙地土壤颗粒组成和矿质养分的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1):54-61.
- [11] 万婷, 涂卫国, 席欢, 等. 川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(4):650-657.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [13] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 等. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(10):40-47.
- [14] 王洋. 不同退化程度下高寒草甸土壤有机碳及团聚体特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [15] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1):7-31.
- [16] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2010, 48(2):412-418.
- [17] 周华坤, 赵新全, 周立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(3):31-40.
- [18] Denef K, Six J, Paustian K, et al. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 33(15):2145-2153.
- [19] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7):1269-1274.
- [20] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J]. *草业学报*, 2010, 19(4):204-211.
- [21] 蔡晓布, 周进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11):2639-2645.

~~~~~

(上接第 35 页)

- [5] 李婕玲, 李朝婵, 胡继伟, 等. 典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1):54-60.
- [6] 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 等. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12):311-318.
- [7] 王雪梅, 柴仲平, 毛东雷, 等. 不同土地利用方式下渭一库绿洲土壤质量评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(4):319-323.
- [8] 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.
- [9] 刘庆新, 吴发启, 刘海斌, 等. 纸坊沟流域土壤酶活性与土壤肥力关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5):1100-1106.
- [10] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3):285-293.
- [11] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5):190-196, 204.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] 刘志鹏, 邵明安, 王云强. 区域尺度下黄土高原土壤全钾含量的空间模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22):132-140.
- [14] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [15] 尹刚强, 田大伦, 方晰, 等. 不同土地利用方式对湘中丘陵区土壤质量的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(8):9-15.
- [16] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12):2292-2296.