

## 黄土丘陵区营造果园后土壤质量效应分析

薛 蕙<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>, 张 超<sup>1,2</sup>, 张昌盛<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**【目的】研究黄土丘陵区坡耕地营造果园后土壤质量变化过程。【方法】采用时空互代法, 以黄土丘陵区不同年限的塌地果园为研究对象, 选取坡耕地为对照, 通过室内测试分析, 并运用统计和相关分析等方法, 研究土壤质量的变化过程。【结果】坡耕地改造为果园后, 在改造初期土壤物理性质和抗蚀性变化不大或略有降低, 随后显著改善并趋于稳定。土壤有机碳和全氮含量在改造前 10 年波动较大, 增幅较慢, 随后增长加速, 15—30 年基本趋于稳定; 碱解氮含量在改造 2 年后增幅即达到显著水平, 随后逐步升高。全磷和速效钾含量在初期显著降低, 随后逐渐上升。速效磷在改造前 10 年变化不大, 随后逐渐升高。pH 随改造年限先升高后降低, CaCO<sub>3</sub>先降低后升高。微生物量碳、氮在改造前 5 年增幅显著, 随后趋于稳定。微生物量磷在改造 10 年增加达到显著水平, 随后逐渐增加。土壤基础呼吸强度在改造 10 年后显著增加, 随后逐渐增加。诱导呼吸强度在改造 5 年后增幅达到显著水平, 随后趋于稳定。代谢商在改造初期显著低于坡耕地, 随后逐渐升高, 15 年后趋于稳定, 和坡耕地没有显著差异。土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性缓慢增加, 在 20—30 年时趋于稳定。过氧化氢酶在改造第 2 年增幅即达到显著水平, 随后随改造年限呈波动式缓慢上升。淀粉酶和多酚氧化酶活性整体随改造时间呈缓慢降低趋势, 分别在 10 年和 2 年时达到显著水平, 10—30 年时趋于稳定。土壤质量指数 (SQI) 作为土壤理化 and 生物学性质的综合反映, 在前 20 年土壤质量改善作用明显, 20—30 年趋于稳定, 回归分析表明 SQI 随年限的增加呈显著的线性关系 ( $r=0.946$ )。【结论】黄土丘陵区坡耕地由于严重的水土流失和不合理耕作方式, 土壤物理、化学和生物学性质较差。改造为塌地果园初期, 物理、化学和生物学性质显著改善, SQI 增加, 改造中后期, 系统处于相对的稳定期, 土壤物理、化学和生物学特性改善作用有所减缓, SQI 趋于稳定。但此阶段却是以高投入高产出的状态在运转, 系统仍旧受到较强的胁迫。

**关键词:** 黄土丘陵区; 人工果园; 土壤质量

## Analysis of Effect of Soil Quality After Orchard Established in Hilly Loess Plateau

XUE Sha<sup>1,2</sup>, LIU Guo-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Chang-sheng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract:** 【Objective】 The study of soil quality after orchard established on slope cropland is of importance to exploration of the soil quality evolution and its evaluation during the agricultural production in loess hilly region. 【Method】 Orchard at different years in loess hilly region was chosen as the subject to reveal changes in soil quality through experimental analysis and statistical method, and the slope cropland was used as reference. 【Result】 The results showed that soil physical properties and anti-erodibility did not change markedly or had a little decrease at the early stage of the land use from slope farmland to orchard, then improved significantly with the following years, and kept stable from 20 to 30 years. Soil organic C, total N content increased slowly with the

收稿日期: 2010-06-23; 接受日期: 2011-01-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB407205)、国家自然科学基金项目 (40801094)、中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-05)、西北农林科技大学 2009 年基本科研业务费青年项目 (QN2009080)

联系方式: 薛 蕙, E-mail: xuesha100@163.com. 通信作者刘国彬, E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

years and reached the peak from 20 to 30 years. Available N improved significantly after 2 years and then increased gradually. Total P and available K dropped at the early stage of restoration and then increased, reached the peak from 20 to 30 years. Available P had no significant change in the first 10 years. The value of pH increased at first but then dropped, which was opposite to  $\text{CaCO}_3$ . The content of soil microbial biomass C increased significantly at the early 5 years and then kept stable, soil microbial biomass P did not vary at the early 10 years and then increased markedly. Basal respiration increased drastically 10 years later and substrate-induced respiration increased significantly 5 years later, then kept stable. Metabolic quotient dropped markedly compared to slope cropland at the early stage but gradually improved with the increase of years, 15 years later, tended to be stable. Urease, alkaline phosphatase, saccharase and cellulase activity increased slowly at early stage and kept stable in 20-30 years. Catalase activity took on wave-like increase, amylase and polyphenol oxidase generally tended to slow drop with years and then kept stable from 10 to 30 years. Soil quality index (SQI), an integral indicator reflecting soil physico-chemical and biological properties, increased markedly in the early 20 years and kept stable in 20-30 years. Regression analysis showed that SQI took on linear increasing with years ( $r=0.946$ ).

**【Conclusion】** The slope farmland had a low content of soil quality (including physico-chemical, biological properties) due to improper tillage practices and heavy erosion. Compared with slope cropland, soil quality improved quickly at the early stage of orchard and tended to be stable with the following years. The ecosystem of orchard faced a strong ecological stress because of its high output based on a high input.

**Key words:** loess hilly region; artificial orchard; soil quality

## 0 引言

**【研究意义】**土壤作为陆地生态系统中的重要组成部分,是物质循环、能量转换和信息传递的核心区域,可以与水、气和植物相互作用影响环境,另一方面又可以反映人类生产经营活动所导致的生物地球化学循环的变化过程。土壤在生态系统中的功能主要体现在其质量上,通常可以通过土壤质量指标来表示和评价土壤健康状况的性状、功能或条件<sup>[1]</sup>。监测农业土地管理常通过分析土壤质量变化方向、幅度和持续时间来实现<sup>[2-3]</sup>,评价土壤质量及其随时间变化的趋势也是农业土地可持续管理中一个很重要的思想和指标<sup>[4-5]</sup>。**【前人研究进展】**黄土高原以其深厚的黄土层和严重的水土流失而闻名于世,但长期以来由于滥垦、滥伐和滥牧,造成该地区坡耕地大量增加,而这种不合理的土地经营方式导致该区域生态系统的进一步恶化。近年来,以实现区域生态系统健康发展为目标,在该地区开展了一系列的生态恢复研究,逐步形成了多种各具特色的水土保持型生态农业建设模式,这些模式已经初步显示出生态经济效益<sup>[6]</sup>。其中营造果园就是一种以农果业为依托的复合农业生态系统,是该地区生态治理的主要模式,目前已有个别研究从土壤肥力、水分等方面探讨了营造果园后土壤系统的变异过程<sup>[7-8]</sup>。**【本研究切入点】**针对营造果园后土壤质量的演变过程方面的研究还鲜见报道。本文以黄土丘陵区不同年限果园为研究对象,选取坡耕地为对照,分析坡耕地退耕营造果园后土壤物理、化学和生物学

特性的变化规律。**【拟解决的关键问题】**揭示坡耕地改造为塌地果园后土壤质量的演变过程,为生态治理过程的土壤质量评价和果园永续经营管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域( $E109^{\circ}13'46''-109^{\circ}16'03''$ ,  $N36^{\circ}46'42''-36^{\circ}46'28''$ ), 该区地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌区。该区属暖温带半干旱季风气候,海拔 1 010—1 400 m,年均气温 8.8℃,年均降水量 505.3 mm。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。纸坊沟流域是中国科学院安塞水土保持试验站生态恢复定位试验研究小流域。该流域生态系统先后经历严重破坏期(1938—1958年)、继续破坏期(1959—1973年)、不稳定期(1974—1983年)、稳定恢复改善期(1983—1990年)和良性生态初步形成期(1991年至今)。经过 30 多年的水土保持综合治理,通过林草植被和工程等措施建设,有效遏制了该流域的土壤侵蚀,成功地恢复了退化生态系统,林地面积从 1980 年的不足 5%增加到 40%以上,流域生态经济系统进入良性循环阶段<sup>[9]</sup>,同时也形成了一系列不同年限的塌地人工果园,这些为本研究提供了可靠的研究对象。

### 1.2 研究方法

采用时空互代法在流域内选择营造和管理方法相近, 土壤与成土母质类型相同, 不同年限的塌地果园 2 年 (Or2)、5 年 (Or5)、10 年 (Or10)、15 年 (Or15)、20 年 (Or20)、30 年 (Or30) 为样地, 选取坡耕地 (sloping cropland, SL) 为对照样地 (表 1)。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

| 样地 Sites | 改造年限 Age (a) | 海拔 Altitude (m) | 土壤类型 Soil type | 作物 Crop                      |
|----------|--------------|-----------------|----------------|------------------------------|
| SL       | 0            | 1175            | 黄绵土 LS         | 谷子 <i>Setaria italic(L.)</i> |
| Or2      | 2            | 1121            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |
| Or5      | 5            | 1128            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |
| Or10     | 10           | 1168            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |
| Or15     | 15           | 1142            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |
| Or20     | 20           | 1150            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |
| Or30     | 30           | 1143            | 黄绵土 LS         | 苹果 <i>Malus domestica</i>    |

LS 表示黄绵土. LS means Loessial soil

### 1.3 样品采集及分析

避开施肥期和施肥点于 2005 年在各试验样地选取 3 个 20 m×20 m 研究小区, 在每个小区按“S”形选取 6 点, 用土钻法取 0—20 cm 土层混合土样, 因为样方之间的距离超过了绝大多数土壤理化性质和微生物性质的空间依赖性<sup>[10]</sup>, 所以上述样方可以看作是真重复。

土壤样品带回室内充分混匀后分成两份, 1 份土样风干、过 1 mm 和 0.25 mm 筛后测定土壤基本化学性质<sup>[11]</sup>。全氮 (TN) 采用半微量凯氏法测定; pH 采用 pH 计测定; 土壤全磷采用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法; 速效磷用 Olsen 法; 速效钾用乙酸铵提取-火焰光度法; 有机碳用重铬酸钾氧化外加热法。另 1 份鲜样过 2 mm 筛用于测定土壤微生物量和呼吸强度, 采用氯仿熏蒸法, 熏蒸后用硫酸钾浸提, 用全自动有机碳分析仪 (Tekmar-Dohrmann Apollo 9000 TOC Combustion Analyzer) 测定微生物量碳, 用全自动定氮仪测定微生物量氮, 用钼锑抗比色法测定微生物量磷<sup>[12-13]</sup>; 土壤呼吸强度采用碱液吸收法<sup>[14]</sup>。

土壤酶活性测定采用常规方法<sup>[15]</sup>, 蔗糖酶测定: 3,5-二硝基水杨酸比色法, 以 24 h 后 1 g 土壤中含有的葡萄糖毫克数表示; 淀粉酶测定: 3,5-二硝基水杨酸比色法, 以 24 h 后 1 g 土壤中含有的麦芽糖毫克数表示; 纤维素酶测定: 硝基水杨酸比色法, 活性以 72 h 后 10 g 土壤生成的葡萄糖毫克数表示; 脲酶测定: 靛酚比色法, 活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH<sub>3</sub>-N 的毫克

数表示; 碱性磷酸酶测定: 磷酸苯二钠比色法, 以 1 g 土壤中 24 h 后苯酚的毫克数; 过氧化氢酶测定: 滴定法 (0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的标准 KMnO<sub>4</sub> 滴定), 活性以 1 g 土壤 20 min 后消耗 0.1 mol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 毫升数表示; 多酚氧化酶测定: 碘量滴定法, 酶活性用滴定相当于 1 g 土壤滤液的 0.01 mol·L<sup>-1</sup> I<sub>2</sub> 的毫升数。

同时用铝饭盒多点 (4—6 点) 采集距树干基部 2 m 左右的 0—20 cm 土层有代表性的原状土样, 保持其原有结构状态, 运回室内, 沿土壤的自然结构轻轻剥开, 剥成直径为 10—20 mm 的小土块, 并剔去粗根和小石块, 在室温下风干备用测定土壤物理性质, 土壤结构用干湿筛法, 干筛采用沙维诺夫法<sup>[16]</sup>, 湿筛采用改进的约得 (Yoder) 法测定<sup>[17]</sup>, 土壤颗粒及微团聚体采用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定。文中各项有关数据计算公式如下<sup>[18-20]</sup>:

$$\text{结构体破坏率}(\%) = \frac{> 0.25 \text{ mm团粒}(\text{干筛} - \text{湿筛})}{> 0.25 \text{ mm团粒}(\text{干筛})} \times 100$$

团聚状况 => 0.05 mm微团聚体 - > 0.05 mm机械组成

$$\text{团聚度}(\%) = \frac{\text{团聚状况}}{> 0.25 \text{ mm机械组成}} \times 100$$

$$\text{分散系数}(\%) = \frac{< 0.001 \text{ mm微团聚体分析值}}{< 0.01 \text{ mm机械组成分析值}} \times 100$$

结构系数(%)=100-分散系数

### 1.4 数据统计分析

差异显著性采用 SAS 6.12 软件中的单因素方差分析 (ANOVA) 方法分析。

## 2 结果

### 2.1 土壤物理性质及抗蚀性

营造果园后土壤物理性质变化较为复杂 (表 2), 容重、孔隙度、大团聚体和 <1 μm 微团聚体含量变化规律性不明显; 水稳性团聚体呈增加趋势, 在营造果园的前 2 年就明显增加, 并在前 10 年基本稳定, 10—15 年又开始增加, 并在 15—30 年时处于第 2 次稳定期; 土壤团聚度和土壤结构体破坏率总体上优于坡耕地, 但是随栽植年限变化规律不明显, 分散系数和结构系数随着改造年限改善明显, 表现为分散系数降低, 结构系数增大, 30 年时分别为对照的 34% 和 5.78 倍。

### 2.2 土壤化学性质

坡耕地改造为果园后, 土壤化学性质显著改善 (表 3)。与坡耕地相比, 土壤有机碳和全氮含量在前 10 年波动较大, 增长幅度较为缓慢, 随后增长加速, 15—30 年基本趋于稳定, 30 年时较坡耕地分别增加了

表 2 不同年限人工果园土壤物理性状及抗蚀性

Table 2 Anti-erodibility and soil physical property of different periods of orchard

| 样地<br>Plot | 容重<br>Bulk<br>density<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 总孔隙度<br>Total<br>porosity<br>(%) | 大团聚体<br>Macro<br>aggregate<br>(%) | 水稳性团聚体<br>Water stable<br>aggregate<br>(%) | <1 μm 微团<br>聚体含量<br><1 μm micro aggregate<br>composition (%) | 土壤团聚度<br>Aggregate<br>degree<br>(%) | 土壤分散系数<br>Dispersion<br>coefficient<br>(%) | 土壤结构系数<br>Soil structure<br>coefficient<br>(%) | 土壤体破坏率<br>Ratio of structure<br>deterioration<br>(%) |
|------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|--|--|-------------------------------------|--|--|--|
| SL2        | 1.14   | 57.04                            | 87.92                             | 12.66                                      | 2.72   | 10.71                               | 87.91                                      | 12.09  | 85.60  |
| Or2        | 1.16   | 56.33                            | 67.10                             | 38.50                                      | 2.56   | 15.85                               | 90.73                                      | 9.27   | 42.62  |
| Or5        | 1.14   | 57.04                            | 71.12                             | 34.30                                      | 2.60   | 45.22                               | 78.14                                      | 21.86  | 51.77  |
| Or10       | 1.33   | 49.83                            | 83.90                             | 36.00                                      | 3.09   | 1.30                                | 32.89                                      | 67.11  | 57.09  |
| Or15       | 1.47   | 44.39                            | 84.52                             | 41.44                                      | 2.96   | 24.34                               | 28.24                                      | 71.76  | 50.97  |
| Or20       | 1.27   | 51.99                            | 81.76                             | 41.60                                      | 3.52   | 41.64                               | 32.21                                      | 67.79  | 49.12  |
| Or30       | 1.14   | 57.04                            | 79.93                             | 41.03                                      | 2.33   | 49.05                               | 30.14                                      | 69.86  | 48.67  |

表 3 人工果园不同年限土壤化学性状

Table 3 Characteristics of soils of different revegetation periods of orchard

| 样地<br>Plot | 有机碳<br>Organic C<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Total N<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Available N<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total P<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷<br>Available P<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | pH<br>(H <sub>2</sub> O,<br>1 : 2.5) | CaCO <sub>3</sub><br>(mg·g <sup>-1</sup> ) |
|------------|---|--|--|--|--|--|--------------------------------------|--|
| SL         | 2.50cd                                    | 0.292d                                 | 17.59d                                       | 0.573b                                 | 2.00d  | 90.10f                                       | 8.68bc                               | 107.82a                                    |
| Or2        | 3.13b                                     | 0.345c                                 | 24.16c                                       | 0.453e                                 | 1.23d  | 84.46g                                       | 8.77ab                               | 104.14b                                    |
| Or5        | 2.32d                                     | 0.294d                                 | 23.28c                                       | 0.427f                                 | 1.32d  | 100.37e                                      | 8.85a                                | 95.66d                                     |
| Or10       | 2.72c                                     | 0.296d                                 | 24.70c                                       | 0.516d                                 | 1.64d  | 166.22d                                      | 8.89a                                | 99.89c                                     |
| Or15       | 4.75a                                     | 0.582a                                 | 30.34b                                       | 0.545c                                 | 5.43c  | 171.84c                                      | 8.52d                                | 73.03f                                     |
| Or20       | 5.07a                                     | 0.539b                                 | 31.19b                                       | 0.638a                                 | 8.77a  | 189.10b                                      | 8.56cd                               | 88.28e                                     |
| Or30       | 4.96a                                     | 0.585a                                 | 34.51a                                       | 0.633a                                 | 6.84b  | 205.22a                                      | 8.58cd                               | 99.18c                                     |

同一列数据后不同字母表明样地之间达到 1% 的显著差异。下同

Values in the same columns that do not contain the same letters are significantly different at the 1% level. The same as below

97%和 100%; 碱解氮含量在改造 2 年后增幅即达到显著水平, 随后逐步升高, 30 年时达到最大值, 较坡耕地增加 96%; 全磷和速效钾含量在栽植初期显著降低, 随后逐渐上升, 20—30 年时达到最大值, 最高较坡耕地增加 11%和 128%; 速效磷在改造前 10 年变化不大, 随后逐渐升高, 30 年时较坡耕地增加 339%; pH 随改造年限先升高后降低, 30 年时较坡耕地降低了 0.1, CaCO<sub>3</sub> 随改造年限的延长先降低后升高, 但仍低于坡耕地。

### 2.3 土壤生物学性质

坡耕地改造为果园后, 随改造年限土壤微生物量、呼吸强度、代谢商呈现出一定的变化规律(表 4)。微生物量碳、氮在改造前 5 年增幅显著, 随后趋于稳定, 30 年时分别较坡耕地增加 115%和 48%; 微生物量磷在改造 10 年增加达到显著水平, 随后逐渐显著增加, 30 年时较坡耕地增幅达 221%; 微生物量碳/有机碳和微生物量氮/全氮在改造初期逐渐升高, 5—10 年

达到最高, 随后显著降低, 微生物量磷/全磷随改造年限逐步增大, 30 年时达到最大, 较坡耕地增加 190%; 土壤基础呼吸强度在改造 10 年后显著增加, 随后逐渐增加, 20—30 年达到最大值, 较坡耕地增加 160%, 诱导呼吸强度在改造 5 年后增幅达到显著水平, 随后趋于稳定, 代谢商在改造初期显著低于坡耕地, 但随着改造年限延长逐渐升高, 15 年后趋于稳定, 和坡耕地没有显著差异。

人工种植果园初期, 随着改造年限的延长, 土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和纤维素酶活性缓慢增加(表 5), 分别在 15 年、5 年、10 年和 5 年后开始增幅达到显著水平, 总体在 20—30 年时趋于稳定, 30 年时较坡耕地增加 127%、93%、113%和 29%; 过氧化氢酶在改造第 2 年增幅即达到显著水平, 随后随改造年限呈波动式缓慢上升, 30 年时较坡耕地增加 40%; 淀粉酶和多酚氧化酶活性整体随改造时间呈缓慢降低趋势, 分别在 10 年和 2 年时达到显著水平,

表 4 人工果园不同年限土壤微生物量、呼吸强度和代谢商

Table 4 Microbial biomasses, respiration strengths and  $q\text{CO}_2$  values of different revegetation periods of orchard

| 样地<br>Plot | SMBC<br>Microbial<br>biomass-C<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | SMBN<br>Microbial<br>biomass-N<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | SMBP<br>Microbial<br>biomass-P<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 微生物量碳/<br>有机碳<br>Cmic/TOC<br>ratio (%) | 微生物量氮/<br>全氮<br>Nmic/TN<br>ratio (%) | 微生物量磷/<br>全磷<br>Pmic/TP<br>ratio (%) | 诱导呼吸<br>强度<br>SIR<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 呼吸强度<br>Microbial<br>respiration<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 代谢商<br>Metabolic quotient<br>( $\text{mg}\text{CO}_2\text{-C}\cdot\text{g}^{-1}\text{biomass-C}\cdot\text{h}^{-1}$ ) |
|------------|--|--|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| SL         | 86.38d   | 13.82b   | 2.35d  | 3.45c                                  | 4.74b                                | 0.41d                                | 124.06d   | 63.40c   | 30.58a   |
| Or2        | 148.60c  | 16.37ab  | 2.11d  | 4.74b                                  | 4.74b                                | 0.47d                                | 163.67cd  | 78.38c   | 21.98b   |
| Or5        | 203.47ab   | 19.70a   | 2.51d  | 8.75a                                  | 6.69a                                | 0.59cd                               | 243.97a   | 89.24bc  | 18.27b   |
| Or10       | 215.56a  | 21.13a   | 3.74c  | 7.91a                                  | 7.15a                                | 0.73bc                               | 187.86bc  | 107.92b  | 20.86b   |
| Or15       | 189.11b  | 20.74a   | 4.91b  | 3.98bc                                 | 3.56b                                | 0.90b                                | 237.66a   | 156.99a  | 34.59a   |
| Or20       | 191.87b  | 19.31a   | 5.44b  | 3.78bc                                 | 3.59b                                | 0.85b                                | 244.37a   | 167.49a  | 36.37a   |
| Or30       | 185.55b  | 20.52a   | 7.55a  | 3.74bc                                 | 3.51b                                | 1.19a                                | 229.60ab  | 165.49a  | 37.16a   |

表 5 人工果园不同年限土壤酶活性

Table 5 Soil enzyme activities of different revegetation periods of orchard

| 样地<br>Plot | 脲酶<br>Urease | 淀粉酶<br>Amylase | 碱性磷酸酶<br>Alkaline phosphatases | 蔗糖酶<br>Saccharase | 纤维素酶<br>Cellulase | 多酚氧化酶酶<br>Polyphenol oxidase | 过氧化氢酶<br>Catalase |
|------------|--------------|----------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| SL         | 0.566c       | 1.227a         | 0.315e                         | 1.052c            | 1.436c            | 2.810a                       | 0.488e            |
| Or2        | 0.548c       | 1.097ab        | 0.367de                        | 1.019c            | 1.496c            | 2.515b                       | 0.555d            |
| Or5        | 0.629bc      | 1.112ab        | 0.410d                         | 1.143c            | 1.680b            | 2.363b                       | 0.605cd           |
| Or10       | 0.679bc      | 0.981b         | 0.457cd                        | 1.411b            | 1.485c            | 1.651d                       | 0.648bc           |
| Or15       | 0.809b       | 1.013b         | 0.540bc                        | 2.039a            | 1.649b            | 2.157c                       | 0.728a            |
| Or20       | 1.265a       | 1.002b         | 0.647a                         | 2.288a            | 1.741ab           | 1.761d                       | 0.661bc           |
| Or30       | 1.282a       | 1.056b         | 0.608ab                        | 2.245a            | 1.854a            | 2.013c                       | 0.683ab           |

10—30 年时趋于稳定,30 年时分别较坡耕地降低 14% 和 28%。

## 2.4 土壤综合质量演变

为了探讨坡耕地营造果园后土壤质量变化过程,对土壤属性进行定量评价,本文采用指标体系评价法,以文中分析的 30 个土壤物理、化学和生物学指标为评价指标。首先运用极差法对诊断指标进行标准化处理,然后运用均方差决策法<sup>[21-22]</sup>计算获取各指标权重,进一步运用加权函数法计算土壤质量指数(SQI)。SQI 作为土壤理化和生物学性质的综合反映,随坡耕地营造果园年限呈极显著的线性关系(图),在前 20 年土壤质量改善作用明显,20—30 年趋于稳定,30 年较坡耕地增加 155%,回归分析表明 SQI 随年限的增加呈显著的线性关系( $r=0.946$ )。

## 3 讨论

土壤物理特征和抗蚀性反映了土壤基本性状和结构,常被作为评定土壤抵抗土壤侵蚀能力的重要参数

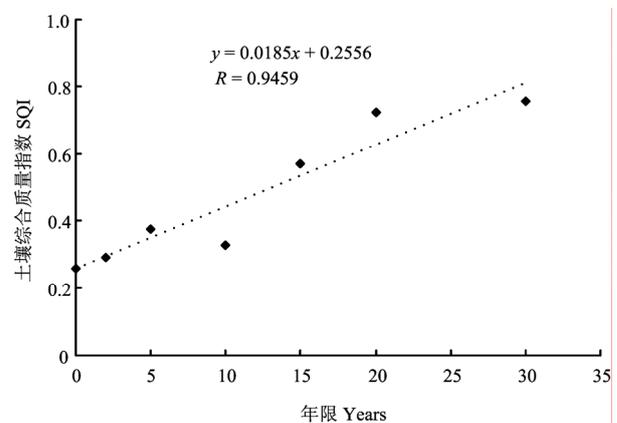


图 2 坡耕地改造为果园后 SQI 演变特征

Fig. 2 Soil quality indices of different ages of orchard

之一<sup>[23-24]</sup>。黄土丘陵区地形破碎,土壤结构疏松,特别是坡耕地由于较为陡峭的坡度、较少的植被覆盖导致了严重的水土流失,土壤物理和抗蚀性能低下,表

现为较低土壤团聚度、结构系数、水稳性团聚体含量和较高的土壤结构体破坏率和分散系数。改造为塌地果园初期,有效降低了土壤坡度,减少了水土和养分流失,且果园初期林间距离较大,当地农民常在林下套种一些作物,作物根系的分割、微生物的分解代谢和土壤动物的活动又增加了土壤中各种胶结物质,团聚度、结构系数和水稳性团聚体明显增加,抗蚀性能显著改善。随着改造年限的增加,保土保水功能逐渐积累,管理经营措施逐渐加强,土壤立地得到改善,但土壤坡度改造初期相比变化不大,林下作物减少并维持稳定,土壤物理特性和抗蚀性能基本趋于稳定。

土壤化学属性反映了土壤的营养状况,是度量土壤生长潜势的指标,研究表明通过坡耕地改造为塌地果园, pH 和  $\text{CaCO}_3$  含量总体呈现缓慢降低趋势,黄土高原地区土壤富含  $\text{CaCO}_3$ , 由于果园管理中大量使用化肥和有机肥,土壤酸性增加, pH 降低,促进了  $\text{CaCO}_3$  转变为  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  含量降低,并进一步使难溶性磷酸钙转化为溶解性较高的磷酸一钙和磷酸二钙,加之磷肥的使用,土壤中速效磷含量增加。另一方面,坡耕地改造为塌地果园后,坡度降低,有效地促进了水分就地入渗,侵蚀对养分流失的作用显著降低,加之更加精细的管理方式增加了养分元素的积累,土壤碳、氮、磷、钾等元素含量增加,土壤化学性质显著改善。

土壤微生物量常被用来评价土壤质量和反映微生物群落状态与功能的变化<sup>[25-27]</sup>,坡耕地经营强度大,表土侵蚀严重,有机物质矿化剧烈,微生物量含量较低<sup>[28-29]</sup>。改造为塌地果园初期,由于土壤坡度的降低,养分流失显著减少,微生物可利用碳源氮源增加,微生物量碳、氮显著增加。5—10年后,坡度因素造成有机物质流失的逐渐减少,生态系统物质流逐渐趋于稳定,并趋于平衡,微生物量碳、氮逐渐稳定。前人研究证明施肥可以增加微生物量磷的含量<sup>[30-31]</sup>,而黄土高原是一个贫磷的地区,磷素的匮乏会影响果园的生长,果农经常使用磷肥来提高磷素供给,一方面促进了果园磷素供给,另一方面使更多的无机磷被同化固持到微生物体内,微生物量磷增加,并随改造年限的增加而增加。微生物量碳、氮、磷分别占有机碳、全氮和全磷的 3.45%—8.75%、3.51%—7.15%和 0.41%—1.19%。微生物量磷/全磷随着改造年限逐步升高,间接证明提高微生物量磷在全磷中所占的比例来维持高的磷素物质代谢能力,是维持果树生长所需要的磷素来源的主要途径之一。

土壤呼吸作为土壤质量和肥力的重要生物学指标,表征着土壤的生物学特性和物质代谢强度,在一定程度上可以反映土壤养分转化和供应能力。坡耕地由于较低的微生物量和较差的养分水分条件,微生物的代谢能力较弱,基础呼吸和诱导呼吸强度很低;在改造初期,随着坡度的降低,养分流失减少,微生物量和呼吸代谢的底物逐渐增加,基础和诱导呼吸强度增加;到了果园中后期,果园系统基本处于平衡状态,土壤物质代谢趋于稳定,呼吸强度保持平稳。代谢商是反映环境、管理措施等变化因素对微生物活性影响的一个敏感性指标<sup>[32-33]</sup>。Odum<sup>[34]</sup>认为环境胁迫条件下,微生物必须从维持生长和繁殖的能量中分流出一部分去补偿由于胁迫所需要付出的额外能量。坡耕地由于人为干扰严重,土壤肥力严重衰退,其保水保肥能力极差,此种环境下微生物要维持其正常的生命活动必然要付出额外的维持能,因此代谢商( $q\text{CO}_2$ )高;改造初期,代谢商整体呈现降低趋势,这可能主要和改造初期果园产果量较低,系统处于休养阶段,人类活动对土壤系统的胁迫作用较低,形成单位微生物质量所呼出的  $\text{CO}_2$  少,  $q\text{CO}_2$  较小;15—30年进入产果盛期,人为活动对土壤系统的胁迫作用逐渐增加,利用相同能量而形成的微生物量小,释放的  $\text{CO}_2$  较多,  $q\text{CO}_2$  增大,和坡耕地没有显著差异。以上结果表明虽然营造果园后期可以显著增加土壤微生物量和呼吸强度,但是却并没有减少  $q\text{CO}_2$ ,整个系统仍然是以一种高投入高产出的状态在运转,系统受到的胁迫较强。

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和腐解的动植物残体<sup>[15]</sup>,参与土壤中各种有机质的分解、合成与转化,以及无机物质的氧化与还原等过程,是土壤生态系统代谢的一类重要动力,在很大程度上不同的土壤酶活性可以从不同的方面反映土壤物质循环与转化的强度,常被用来反映土壤生态系统变化的预警和敏感指标<sup>[35-36]</sup>。坡耕地属于开放性的农田生态系统,较大的坡度导致了严重的营养元素流失,土壤有机质和微生物量含量较低,其物质代谢速率较慢,酶活性较低。改造初期,较好的地形和立地条件有利于微生物的生长,加之较多的酶促底物共同促进了土壤物质元素的分解代谢,脲酶、磷酸酶、纤维素酶、蔗糖酶等水解酶类和抗氧化还原的过氧化氢酶活性增加显著,到了产果盛期,土壤物质代谢系统处于动态平衡,酶活性基本维持稳定。研究还发现参与土壤腐殖质组分中芳香族化合物转化作用的多酚氧化酶则呈现降低趋势,这可能主要与该地区土壤凋落

物的分解代谢途径有关。

土壤质量指数 (SQI) 作为土壤物理、化学和生物属性的综合反映, 可以客观、全面地反映土壤质量的变化过程。黄土丘陵区坡耕地由于人为耕作活动的干扰, 水土流失严重, 土壤物理、化学和生物属性较差, 综合质量较低。改造初期, 土壤坡度降低, 减少了土壤和养分流失, 促进了水分和养分的就地储存, 土壤结构得到了有效的改善, 促进了土壤团粒结构的形成, 土壤有机质和微生物量逐渐增加, 物质转化能力增强, 土壤生化活性明显提高, SQI 明显改善; 改造中后期, 土壤坡度和林下植被趋于稳定, 对养分流失、土壤结构、生物活性等方面的改善作用趋于稳定, 整个系统的物质循环基本处于一个稳定的状态, SQI 增幅减缓并趋于稳定。

## 4 结 论

黄土丘陵区坡耕地由于严重的水土流失和不合理的耕作方式, 土壤物理、化学和生物学性质较差; 改造为塌地果园初期, 坡度降低, 水土流失减少, 化学性质增强, 特别是有机质等物质的积累促进了土壤结构的形成, 物理性质和抗蚀性显著改善, 进一步为土壤微生物的生长提供了优越的条件, 微生物量增加, 代谢能力增强, 酶活性显著改善, SQI 显著增加; 改造中后期, 坡度对土壤物理、化学和生物学性质的改善作用消失, 系统处于相对的稳定期, 土壤物理、化学和生物学特性改善作用有所减缓, SQI 趋于稳定, 但此阶段却是以高投入高产出的状态在运转, 系统仍旧受到较强的胁迫。

## References

- [1] 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.  
Zheng Z P, Liu Z X. Soil quality and its evaluation, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 131-134. (in Chinese)
- [2] Hartemink E A. Soil chemical and physical properties as indicator of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma*, 1998, 85:283-306.
- [3] Wang X, Gong Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 1998, 81: 339-355.
- [4] Arshad M A, Coen G M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1992, 7: 25-31.
- [5] Herrick J E. Soil quality: an indicator of sustainable land management. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 75-83.
- [6] 戴全厚, 刘国彬, 刘普灵, 梁银丽, 吴发启, 梁宗锁, 王继军. 黄土丘陵区中尺度生态经济系统健康评价方法探索. 中国农业科学, 2005, 38(5): 990-998.  
Dai Q H, Liu G B, Liu P L, Liang Y L, Wu F Q, Liang Z S, Wang J J. Approach to health diagnoses of eco-economic system in mesoscale in Loess Hilly Area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 990-998. (in Chinese)
- [7] 江泽普, 韦广波, 谭宏伟. 广西红壤果园土壤肥力演化与评价. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 312-318.  
Jiang Z P, Wei G P, Tan H W. The evolution and evaluation of orchard soil fertility in red earth regions of Guangxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 312-318. (in Chinese)
- [8] 樊 军, 邵明安, 郝明德, 王全九. 渭北旱塬苹果园土壤深层干燥化与硝酸盐累积. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1213-1216.  
Fan J, Shao M A, Hao M D, Wang Q J. Desiccation and nitrate accumulation of apple orchard soil on the Weibei dryland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1213-1216. (in Chinese)
- [9] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective. *Ambio*, 1999, 28(8): 663-668
- [10] Mariotte C A, Hudson G, Hamilton D. Spatial variability of soil total C and N and their stable isotopes in upland Scottish grassland. *Plant and Soil*, 1997, 196: 151-162.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.  
Lu R K. *Analytical Methods for Soil and Agrochemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [12] Horwath W R, Paul E A. Microbial biomass//Weaver R W, Angle J S, Bottomley P S. *Methods of Soil Analysis, Part 2-Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: American Society of Agronomy, 1994.
- [13] 何振立. 土壤微生物量的测定方法: 现状和展望. 土壤学进展, 1994, 22(4): 36-44.  
He Z L. Method for measuring soil microbial biomass: Present and future. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(4): 36-44. (in Chinese)
- [14] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986: 226-227.  
Xu G H, Zheng H Y. *Analytical Handbook of Soil Microbes*. Beijing: China Agricultural Press, 1986. (in Chinese)
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 274-332.  
Guan S Y. *Soil Enzyme and Research Method*. Beijing: China Agricultural Press, 1986: 274-332. (in Chinese)
- [16] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.

- Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. Beijing: Standard Press of China, 1996. (in Chinese)
- [17] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题. *水土保持研究*, 1997, 4(5): 91-101.
- Liu G B. Soil anti-scourability research and its perspectives in Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(5): 91-101. (in Chinese)
- [18] 中国科学院南京土壤研究所主编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Method for Measuring Physical Properties of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. (in Chinese)
- [19] 杨玉盛, 何宗明, 林光耀, 罗学升. 不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究. *水土保持学报*, 1996, 2(2): 32-37.
- Yang Y S, He Z M, Lin G Y, Luo X S. Effect of different control model on anti-erodibility of seriously deteriorated red soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 2(2): 32-37. (in Chinese)
- [20] 刘进金. 土壤可蚀性之定性定量. *中华林学季刊*, 1984, 17(1): 93-105.
- Liu J J. Qualitative and quantitative analysis of soil erodibility. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 1984, 17(1): 93-105. (in Chinese)
- [21] 王书华, 毛汉英. 土地综合承载力指标体系设计及评价. *自然资源学报*, 2001, 16(3): 248-254.
- Wang S H, Mao H Y. Design and evaluation on the indicator system of land comprehensive carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(3): 248-254. (in Chinese)
- [22] 王明涛. 多指标综合评价中权重确定的离差、均方差决策方法. *中国软科学*, 1999, 8(8): 100-107.
- Wang M T. Decision-making on deviation and mean variance of weight determination in multi-indicators evaluation. *China Soft Science*, 1999, 8(8): 100-107. (in Chinese)
- [23] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态. *水土保持科技情报*, 2001, 1(1): 36-39.
- Ding W F, Li Z B. Development on research for soil anti-erodibility. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2001, 1(1): 36-39. (in Chinese)
- [24] 阮伏水. 关于土壤可蚀性指标的讨论. *水土保持通报*, 1996, 16(6): 68-72.
- Ruan F S. A review on the indexes of soil erodibility. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(6): 68-72. (in Chinese)
- [25] Powlson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(2): 159-164.
- [26] Anderson T H, Dormsch K H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> ( $q_{CO_2}$ ) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(3): 393-395.
- [27] Rogers B F, Tate R L, III. Temporal analysis of the soil microbial community along a top sequence in pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10): 1389-1401.
- [28] 王 岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 45-51.
- Wang Y, Shen Q R, Shi R H, Huang D M. Soil microbial biomass and its ecological effects. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1996, 19(4): 45-51. (in Chinese)
- [29] 杨武德, 王兆骞, 睦国平. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 175-178.
- Yang W D, Wang Z Q, Sui G P. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 175-178. (in Chinese)
- [30] 来 璐, 郝明德, 王永功. 黄土高原旱地长期轮作与施肥土壤微生物量磷的变化. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 546-549.
- Lai L, Hao M D, Wang Y G. Changes of long-term rotation and fertilization on soil microbial Phosphorus under dry land in Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5): 546-549. (in Chinese)
- [31] Ghoshal N, Singh K P. Effect of farmyard manure and inorganic fertilizer on the dynamics of soil microbial biomass in a tropical dry land agroecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19: 231-238.
- [32] Brookes P C, Andera L, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [33] Brookes P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility Soils*, 1995, 19: 269-279.
- [34] Odum E. Trends expected in stressed ecosystems. *Bioscience*, 1985, 35: 419-422.
- [35] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987.
- Zhou L K. *Soil Enzymology*. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [36] 南京土壤研究所. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Methods for Studying Soil Microbial*. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)