

黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应

薛 蕙^{1,2}, 刘国彬^{1,2}*, 张 超^{1,2}, 樊良心^{1,2}

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

摘 要: 采用时空互代法, 以黄土丘陵区纸坊沟流域不同年限梯田为研究对象, 选取坡耕地为对照, 分析了坡耕地改造梯田后, 土壤物理、化学和生物学性质的演变过程。结果表明, 黄土丘陵区坡耕通过工程措施改造为梯田当年, 在土壤扰动和水土流失双重作用下, 土壤物理、化学和生物学质量呈现不同程度下降或没有显著变化。随着改造年限的延长, 土壤质量显著提高, 表现为土壤物理性质和抗蚀性显著增强, 化学性质显著提高, 土壤微生物属性及活性显著增加。土壤质量指数 (SQI) 作为土壤理化和生物学性质的综合反映, 其随改造年限的增加呈显著的线性增加关系, 说明采用工程技术进行坡改梯后, 土壤经营和管理趋于科学化, 土壤质量向良性方向发展。

关键词: 土地整理, 土壤质量, 坡改梯, 黄土丘陵区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.054

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0310-07

薛 蕙, 刘国彬, 张 超, 等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 310—316.
Xue Sha, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in Hilly Region of Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 310—316. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

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; 土壤通过与水、大气和植物相互作用来影响环境的波动, 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^[1]。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^[2-3], 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^[4-5]。

黄土高原以其深厚的黄土层和严重的水土流失而受到广泛关注, 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, 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^[6]。其中梯田建设可以有效降低地面坡度, 改变小地形, 从而增加入渗、减少径流速率, 提高土壤质量, 增加作

物产量^[7-9], 是黄土高原水土流失治理中广泛采用的一项主要工程措施, 在农业生产和农村经济发展中的作用越来越明显^[10]。目前针对梯田研究主要集中于梯田的分类与设计、蓄水保土效益、农地生产力和水环境效应等方面^[11-13], 对于坡耕地改造为梯田后土壤质量的演变过程研究较少, 因此本文以黄土丘陵区不同年限梯田为研究对象, 选取坡耕地为对照, 分析坡改梯后土壤质量的演变过程, 揭示坡改梯对土壤生态环境的作用机制, 为该地区生态治理过程中土壤质量评价提供科学依据。

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°13'46"-109°16'03", N36°46'42"-36°46'28"), 该区地形破碎, 沟壑纵横, 属黄土高原丘陵沟壑地貌, 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土正常新成土 (相应于 FAO 分类系统中的钙积始成土) 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。纸坊沟流域是中科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^[14], 同时也形成了一系列不同年限的梯田, 从而为本研究提供了可靠的研究对象。这些梯田主要是

收稿日期: 2010-06-07 修订日期: 2011-04-20

项目名称: 国家自然科学基金基项目 (40801094); 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB407205); 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资助计划 (QN2009080)
作者简介: 薛 蕙 (1978—), 男, 陕西西安人, 博士, 主要从事于微生物生态与恢复生态学研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。
Email: xuasha100@163.com。

*通信作者: 刘国彬 (1958—), 男, 陕西榆林人, 研究员, 博士生导师, 从事于流域管理与水土保持研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

机修梯田, 具体是通过推土机等机械将坡度不大于 15° 的坡耕地采用等高法从里向外推出田面宽度在 10~15 m 左右, 埂高 3 m 左右的梯田, 其田埂材料为黄绵土。

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, 不同年限的梯田 1 a (Te1)、8 a (Te8)、20 a (Te20)、30 a (Te30), 选取坡耕地 (slope cropland, SL) 为对照样地 (表 1)。这些样地水分来源主要是依靠天然降雨, 其中玉米播种前施有机肥 $1.49 \times 10^4 \sim 2.24 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$, 生长季期间追施 746 kg/hm^2 磷肥和 746 kg/hm^2 尿素; 谷子播前施有机肥 $1.49 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$, 生长季追施尿素 149~224 kg/hm^2 , 以上作物均为连年单作。所有作物秸秆以能源材料或者牲畜饲料形式被利用, 不回田, 根茬通过犁地挖掘等方式取出并就地焚烧回田。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of the sampling plots

样地	改造年限/a	海拔/m	土壤类型	坡度/°	作物
SL	0	1 175	黄绵土	15~20	谷子
Te1	1	1 161	黄绵土	0~5	玉米
Te8	8	1 149	黄绵土	0~5	玉米
Te20	20	1 153	黄绵土	0~5	玉米
Te30	30	1 148	黄绵土	0~5	玉米

SL-对照样地, Te1 坡改梯 1 a, Te8 坡改梯 8 a, Te20 坡改梯 20 a, Te30 坡改梯 30 a, 下同

1.2 样品采集及分析

2006 年 7 月, 避开施肥期和施肥点在各试验样地选取 3 个 20 m×20 m 研究小区, 每个小区之间相隔大于 30 m, 在每个小区按 S 型选取 6 点, 用土钻法取 0~20 mm 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^[15], 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 2 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^[16], 另 1 份鲜样过 2 mm 筛用于测定土壤生物学性质。同时用铝饭盒多点 (4~6 点) 采集 0~20 cm 表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。

1.2.1 土壤化学性质测定

1) 全氮 (TN) 采用半微量凯氏法测定; 2) pH 值采用 pH 计测定, 水土比为 2.5:1; 3) 土壤全磷采用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法; 4) 速效磷用 Olsen 法; 5) 速效钾用乙酸铵提取-火焰光度法; 6) 有机碳用重铬酸钾氧化外加热法。

1.2.2 土壤生物学性质测定

另 1 份鲜样过 2 mm 筛用于测定土壤微生物量、微生物群落数量及其活性, 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^[17]; 土壤呼吸强度采用碱液吸收法, 微生物

群落数量采用稀释平板法, 氨化作用强度、硝化作用强度、固氮作用强度采用土壤培养法, 纤维素分解强度采用埋片法^[18]。

土壤酶活性测定采用常规方法^[19], 1) 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; 2) 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; 3) 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; 4) 脲酶测定: 靛酚比色法, 活性以 24 h 后 1 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示; 5) 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; 6) 过氧化氢酶测定: 滴定法 (0.1 mol/L 的标准 KMnO_4 滴定), 活性以 1 g 土壤 20 min 后消耗 0.1 mol/L KMnO_4 毫升数表示; 7) 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 I_2 的毫升数。

1.2.3 土壤物理性质测定

土壤结构采用干湿筛法, 干筛采用沙维诺夫法^[20], 湿筛采用改进的约得 (Yoder) 法测定^[21], 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。文中各项数据计算公式如下^[22-24]:

$$X_1 = (n_1 - n_2) / n_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_1 为土壤结构破坏率, %, n_1 为 >0.25 mm 团聚体分析值 (干筛), %, n_2 为 >0.25 mm 团聚体分析值 (湿筛), %。

$$X_2 = n_3 - n_4 \quad (2)$$

式中, X_2 为土壤团聚状况, n_3 为 >0.05 mm 微团聚体分析值, %, n_4 为 >0.05 mm 机械组成分析值, %。

$$X_3 = X_2 / n_3 \times 100\% \quad (3)$$

式中, X_3 为土壤团聚度, X_2 为团聚状况, n_3 为 >0.05 mm 微团聚体分析值, %。

$$X_4 = n_5 / n_6 \quad (4)$$

式中, X_4 为分散系数, n_5 为 <0.001 mm 微团聚体分析值, %, n_6 为 <0.001 mm 机械组成分析值, %。

1.3 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 结果与分析

2.1 土壤化学性质

土壤化学属性是土壤质量的重要组成部分, 反映土壤的营养状况, 是度量土壤生长潜势的指标。研究表明, 采用工程技术实现坡改梯后, 与坡耕地相比 (表 2), 除碱解氮和速效磷在改造第 1a 增幅没有达到显著水平外, 土壤有机碳、全氮和速效钾在改造 1 a 后即达到显著水平, 且增幅随改造年限逐渐上升, 30 a 时有机碳、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾分别较坡耕地增加 146%、155%、179%、14%、199% 和 126%; pH 值在初期有所升高, 随后逐渐降低, 差异不显著, 坡改梯 30 a 的较坡耕地降低 0.12; CaCO_3 在改造 1 a 时显著增高, 随后逐渐降低, 差

异显著;就整体而言,坡耕地改造为梯田后,土壤化学性质显著改善,但随改造年限变化规律不明显。土壤化学性质较易受外界环境因素的影响,通过工程措施把坡耕地改造为梯田当年,由于工程整地措施的实施,大量下层土壤被翻到上层,而下层的土壤有较高的 pH 值和 CaCO_3 含量,因此在改造当年 pH 和 CaCO_3 含量呈现一定程度的增加,但是随着改造年限的延长,呈现出下降趋势,黄土高原地区土壤富含磷酸钙,当农作物秸秆、

杂草的凋落物分解形成有机酸、酚类物质和无机酸后, pH 值降低,同时促进 CaCO_3 向 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 转移, 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,土壤中速效磷含量增加。坡耕地改造为梯田后,坡度降低,使水分就地入渗,减弱了土壤侵蚀作用,养分流失降低,加之连年的耕作及有机和无机肥料的投入,促进了物质元素的积累,土壤碳、氮、磷、钾等元素含量增加,土壤化学性质显著改善。

表 2 不同年限梯田土壤化学性状
Table 2 Chemical characteristics of soils of terrace at different ages

样地	有机碳/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 值	CaCO_3 / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
SL	2.50±0.07d	0.292±0.021e	17.59±0.47d	0.573±0.003d	2.00±0.28c	90.10±1.74e	8.68±0.15ab	107.82±0.17b
Te1	3.11±0.21c	0.327±0.014d	20.24±1.41d	0.599±0.002bc	1.87±0.06c	125.70±2.29c	8.71±0.08ab	111.93±0.66a
Te8	3.28±0.12c	0.444±0.009c	24.89±1.43c	0.610±0.001b	5.62±0.35a	113.77±2.34d	8.76±0.05a	108.38±1.62b
Te20	5.08±0.03b	0.652±0.010b	53.75±0.94a	0.585±0.002cd	4.78±0.24b	151.29±1.76b	8.63±0.04ab	104.05±1.55c
Te30	6.16±0.08a	0.746±0.026a	49.11±1.88b	0.655±0.002a	5.98±0.54a	204.50±4.60a	8.56±0.02b	102.30±1.07d

注:同一列中所带字母不相同,表明样地之间达到显著差异 ($p<0.05$)

2.2 土壤物理性质及抗蚀性

土壤物理特征是反映土壤基本性状和结构的指标,是土壤质量评价的基础,土壤抗蚀性是土壤对侵蚀营力分散和搬运作用的抵抗能力,是评定土壤抵抗土壤侵蚀能力的重要参数之一^[25]。坡耕地改造为梯田后,土壤物理性质和抗蚀性变化如表 3 所示,在改造后 1 a 当年体积质量和水稳性团聚体没有明显变化,随后逐渐增加,改造 30 a 后达到最大值;土壤结构破坏率在改造后 1 a 变化不大,随后随改造年限逐渐降低,改造 30 a 后达到最低值,较坡耕地降低 34%;大团聚体、土壤分散系数和结构系数整体变化不明显; $<1\ \mu\text{m}$ 微团聚体质量分数波动较大;土壤团聚度在改造后 8 a 逐渐升高,随后开始下降,改造 30 a 后降到最低值;土壤结构性颗粒指数在改造 1 a

略有降低,随后逐渐升高,改造后 20~30 a 间趋于稳定。黄土丘陵区地形破碎,土壤结构疏松,特别是坡耕地由于不合理的耕作方式,造成土壤物理特性和抗蚀性能低下,表现为较低的体积质量、结构性颗粒指数、水稳性团聚体含量,和较高的土壤体破坏率。通过工程措施改造为梯田当年,虽然有利于保土保水,但由于对土体的扰动较大,破坏了土壤结构,上述土壤物理特性和抗蚀性并未显著改善,随着改造年限的增加,保土保水功能逐渐积累,土壤中各种胶结物质数量逐渐增加,特别是有机物质的增多,促进了土壤颗粒的团聚作用,加之根系的分割、微生物的分解代谢和土壤动物的活动,使水稳性团聚体和微团粒逐渐从小粒径向大粒径转变,土壤物理结构得到改善,抗蚀性增强。

表 3 不同年限梯田土壤物理性状及抗蚀性
Table 3 Anti-erodibility and soil physical property of terrace at different ages

样地	体积质量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	结构性颗粒指数/%	大团聚体/%	水稳性团聚体/%	$<1\ \mu\text{m}$ 微团聚体/%	土壤团聚度/%	土壤分散系数	土壤结构系数	土壤结构破坏率/%
SL	1.14±0.03ab	4.87±0.31b	87.92±8.36a	12.66±0.11d	2.72±0.01d	10.71±0.41b	87.91±0.87a	12.09±0.87b	85.60±1.49a
Te1	1.13±0.01b	4.65±0.29b	83.36±12.15a	12.84±0.08d	3.07±0.01a	12.08±1.46b	86.46±2.43a	13.54±2.43b	84.60±2.12a
Te8	1.17±0.01ab	4.92±0.08b	83.45±8.47a	17.56±0.59c	2.76±0.02c	15.55±0.79a	66.04±0.36b	33.96±0.36a	78.96±2.83a
Te20	1.17±0.04ab	5.92±0.07a	83.40±9.14a	22.28±1.40b	3.11±0.02a	5.91±0.82c	85.06±0.58a	14.94±0.58b	73.29±3.74a
Te30	1.21±0.03a	5.86±0.14a	85.10±0.19a	36.91±2.16a	3.00±0.02b	2.12±0.16d	85.22±0.73a	14.78±0.73b	56.63±2.51b

注:同一列中所带字母不相同,表明样地之间达到显著差异 ($p<0.05$)

2.3 土壤生物学性质

土壤微生物量是表征土壤生态系统中物质和能量流动的重要参数,其周转周期短,可以灵敏地反映环境因子、土地经营模式和生态功能的变化过程,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^[26]。坡耕地改造为梯田,土壤微生物量、呼吸强度和代谢商变化规律明显(表 4)。与坡耕地相比,土壤微生物量碳、氮在改造 1 a 显著降低,随后逐渐增加,微生物量磷增加幅度较为缓慢,经过 20 a 才达到显著水平,随后增幅加大,

改造 30 a 时微生物量碳、氮、磷较坡耕地增幅分别达 134%、175%和 385%;微生物量碳/有机碳和微生物量氮/全氮在改造 1 a 显著降低,随后显著增加,和坡耕地没有显著差异,微生物量磷/全磷与微生物量磷变化规律相似,改造 30 a 时达到最大,较坡耕地增加 324%。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^[27-28];改造为梯田当年后,下层土壤被挪动到上层,造成土壤微生物量的暂时降低,随着改造年限的增加,有机物质输入逐渐增多,加之有效的减少了养分流失,

微生物可利用的碳源氮源增加, 微生物量碳、氮、磷显著增加。微生物量碳占有有机碳和微生物量氮占全氮的比例分别为 2.01%~3.64% 和 1.49%~5.21%, 仅在改造当年显著低于坡耕地, 随后与坡耕地差异不显著, 表明梯田虽然可以增加土壤微生物量碳、氮含量, 却并不增加它们在土壤

总碳和总氮中的比例。与微生物量碳、氮相反, 微生物量磷/全磷随着改造年限逐步升高, 说明磷素贫瘠的黄土高原土壤, 经坡耕地改造为梯田后, 可以通过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, 是维持作物生长所需要的磷素来源的主要途径之一。

表 4 不同年限梯田土壤微生物量、呼吸强度和代谢商

Table 4 Microbial biomasses, respiration and $q\text{CO}_2$ values of terrace at different ages

样地	微生物量碳/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	微生物量氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	微生物量磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	微生物量碳/ /有机碳/%	微生物量 氮/全氮/%	微生物量磷 /全磷/%	诱导呼吸强度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	呼吸强度/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	代谢商/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
SL	86.38±5.48d	13.82±2.55c	2.35±0.49c	3.45±0.31a	4.74±0.53a	0.41±0.09c	124.06±12.20e	63.40±9.30d	30.58±1.76c
Te1	62.31±3.18e	4.87±1.30d	2.68±0.29c	2.01±0.13b	1.49±0.34b	0.45±0.04c	175.41±3.08d	77.12±11.38d	51.57±3.89a
Te8	119.35±8.04c	21.66±1.90b	3.38±0.57c	3.64±0.38a	4.88±0.49a	0.55±0.10c	281.41±10.42c	115.16±3.72c	40.20±2.31b
Te20	178.43±2.48b	33.92±2.84a	4.69±0.45b	3.51±0.27a	5.21±0.55a	0.80±0.05b	329.15±11.91b	144.84±10.24b	33.82±3.39c
Te30	202.48±3.99a	38.07±2.47a	11.40±0.85a	3.29±0.23a	5.10±0.26a	1.74±0.08a	365.98±18.11a	212.28±6.61a	43.68±1.76b

注: 同一列中所带字母不相同, 表明样地之间达到显著差异 ($p<0.05$)

土壤呼吸作为土壤质量和肥力的重要生物学指标, 在一定程度上可以反映土壤养分转化和供应能力, 表征着土壤的生物学特性和物质代谢强度。研究表明(表 4), 土壤基础呼吸强度和诱导呼吸强度随改造年限逐渐升高, 分别在 8 a 和 1 a 增幅达到显著水平, 30 a 时较坡耕地增加 235% 和 195%, 代谢商改造 1 a 后较坡耕地显著增加, 随后显著降低, 但仍高于坡耕地。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。随着改造年限的延长, 有效地减少了土壤水分和养分流失, 土壤微生物呼吸代谢的底物逐渐增加, 基础和诱导呼吸强度增加。代谢商是基础呼吸强度和微生物量碳的比值, 代表了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率, 是反映环境因素、管理措施变化等对微生物活性影响的一个敏感性指标^[29]。Odum^[30]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 $q\text{CO}_2$ 高; 改造为梯田后, $q\text{CO}_2$ 整体呈现增加趋势, 据此推测虽然坡改梯可以显著增加土壤微生物量和呼吸强度, 但是却并没有减少人为活动对土壤系统的胁迫作用, 高强度的耕作方式不能降低单位微生物质量所呼出的 CO_2 含量, 即利用相同能量而形成的微生物量小, 释放的 CO_2 较多, 微生物体的周转率快, 平均菌龄低。

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^[19], 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, 常被用来反应土壤生态系统变化的预警和敏感指标^[31]。坡耕地改造为梯田后, 土壤酶活性变化规律明显(表 5)。土壤脲酶和蔗糖酶在改造 1a 后较坡耕地显著降低, 随后逐渐升高, 30a 时达到最大值, 较坡耕地增加 134% 和 85%; 碱性磷酸酶和过氧化氢酶随改造年限成呈增加趋势, 但在改造前 8a 增幅不显著, 30 a 时较坡耕地增加 130% 和 31%, 增幅显著; 纤维素酶在改造 1 a 后较坡耕地显著降低, 随后迅速上升, 并趋于稳定和坡耕地没有显著差异; 淀粉酶整体变化幅度不大, 随改造时间规律不明显; 多酚氧化酶活性随改造年限呈降低趋势, 8 a 后达到显著水平, 并趋于稳定, 30 a 后较坡耕地降低 54%。坡耕地属于开放性的农田生态系统, 大量的营养元素流失, 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; 改造为梯田后, 良好的水分条件和土壤结构有利于微生物的生长, 从而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显著增加, 表明坡改梯不仅可以有效地缓解生物氧化作用对土壤和生物体的破坏能力, 而且可以促进土壤中可被植被生长利用的碳氮磷源物质的积累, 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。

表 5 不同年限梯田土壤酶活性

Table 5 Soil enzyme activities of different age of terrace

样地	脲酶	淀粉酶	碱性磷酸酶	蔗糖酶	纤维素酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
SL	0.566±0.138bc	1.227±0.194ab	0.315±0.029c	1.052±0.306b	1.436±0.113a	2.810±0.092a	0.488±0.021c
Te1	0.365±0.045d	1.088±0.048b	0.296±0.023c	0.534±0.010c	0.666±0.333b	2.589±0.135a	0.575±0.032bc
Te8	0.435±0.017cd	1.336±0.121a	0.329±0.010c	0.695±0.157c	1.301±0.072a	1.721±0.121b	0.568±0.047bc
Te20	0.666±0.032b	1.090±0.022b	0.616±0.042b	1.241±0.204b	1.418±0.014a	1.861±0.227b	0.878±0.095a
Te30	1.321±0.213a	1.330±0.090a	0.724±0.025a	1.946±0.107a	1.342±0.101a	1.821±0.125b	0.638±0.091b

注: 同一列中所带字母不相同, 表明样地之间达到显著差异 ($p<0.05$)

土壤微生物群落是土壤生物区系中最重要的功能组分,其群落组成对土壤环境条件变化反应敏感,土壤氮化、硝化、固氮及纤维素分解等生化作用强度是在土壤各主要微生物生理类群参与下进行的,对维持其生态系统的碳、氮平衡有着重要作用^[18]。坡耕地改造为梯田后,土壤微生物群落和活性随改造年限变化规律明显(表6)。土壤细菌、真菌和放线菌在改造第1年即达到显著水平,随后随年限逐渐增加,30年时较坡耕地分别增加9.26、10.36和2.39倍;硝化作用和固氮作用随改造年限延长逐渐增加,增幅分别在第1年和第8年达到显著,30年时分别较坡耕

地增加167%和299%;氨化作用在1年时增幅达到显著水平,随后趋于稳定,20年后略有降低,但仍显著高于坡耕地;纤维素分解作用随改造年限呈波动式上升,30年时较坡耕地增加200%。坡耕地由于较差的立地条件和严重的水土流失,土壤微生物主要生理类群数量极低,导致生化活性强度偏低,土壤碳、氮等物质元素转化速度较慢,随着改造为梯田年限的延长,有机物质流失减少,土壤透气性和腐殖化作用增强,促进了微生物生长代谢所需的营养元素的形成与发育,微生物主要类群数量均呈现增加趋势,碳氮等物质元素转化速率加快,生化活性强度增强。

表6 不同年限梯田土壤微生物群落和活性演变
Table 6 Soil microbial population and activities of different age of terrace

样地	细菌/ (10 ⁸ cfu·g ⁻¹)	真菌/ (10 ⁴ cfu·g ⁻¹)	放线菌/ (10 ⁷ cfu·g ⁻¹)	硝化作用/ (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	氨化作用/ (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	固氮作用/ (mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	纤维素分解 作用/%
SL	0.42±0.09d	0.89±0.12d	0.56±0.06e	0.268±0.051c	0.185±0.018c	1.93±0.08d	3.61±0.52d
Te1	1.94±0.13c	3.50±0.23c	1.10±0.05d	0.194±0.012c	0.276±0.032ab	2.66±0.15c	5.33±0.55c
Te8	2.14±0.47bc	2.51±0.92cd	1.94±0.15c	0.452±0.032b	0.299±0.012a	4.70±0.52b	8.66±0.87b
Te20	2.25±0.14b	8.62±0.86b	2.45±0.09b	0.447±0.026b	0.337±0.025a	4.07±0.34b	5.1.3±0.43c
Te30	4.31±0.20a	10.11±1.01a	2.90±0.17a	0.716±0.045a	0.259±0.020b	7.70±0.42a	10.83±0.97a

注:同一列中所带字母不相同,表明样地之间达到显著差异($p<0.05$)。

2.4 土壤综合质量演变

为了探讨坡耕地改造为梯田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,对文中的37个土壤物理、化学和生物学指标进行综合。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^[32]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,其高低在一定程度上可以表示土壤的肥力和潜在生产力,在坡耕地改造为梯田后其随改造年限变化规律显著(图1),在改造第1年SQI较坡耕地降低11%,随后显著增加,30a较坡耕地增加276%,回归分析表明SQI随年限的增加呈显著的线性关系($R=0.995$)。黄土丘陵区坡耕地受到人为耕作活动的干扰,水土流失极其严重,土壤物理、化学和生物属性较差,综合质量较低,相对于其它土地利用方式在1m土壤剖面上各种属性变异相对较低,但仍具有表聚作用。通过工程措施改造为梯田后,土壤受到扰动,当不同层次土壤混合后,必然会导致土壤物理、化学和生物学质量的下降,但是由于坡改梯后显著的改善了土壤的坡度,降低了水土流失强度,加之生物的自肥作用,从而有效的促进了养分的就地积累,相对减少或抵消了由于土壤扰动对土壤质量的降低作用。并随着改造年限的延长,梯田的水土保持和农业管理措施功能逐步增强,土壤结构得到了有效改善,从而促进了水分和养分的就地储存,加之土壤中归还物质的增多,特别是有机质分解作用的增强,进一步促进了土壤团粒结构的形成和微生物量的增加,土壤生化活性明显增加,SQI明显改善。

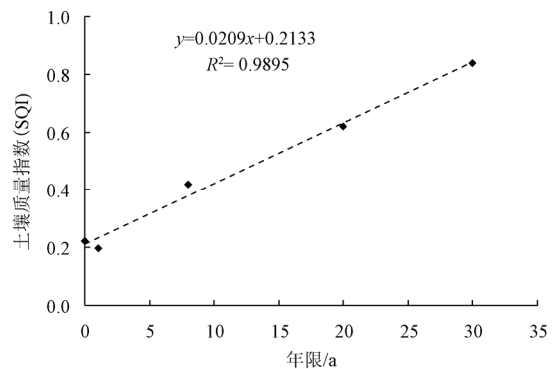


图1 坡耕地改造为梯田后SQI演变特征
Fig.1 Soil quality indices of different age of terrace

3 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、化学和生物学性质极其低下,采用工程技术实现坡改梯后,土壤性质变化显著,主要表现为:

1) 通过工程措施改造为梯田当年,在土壤扰动和水土流失双重作用下,土壤物理、化学和生物学质量呈现不同程度下降或没有显著变化。随着改造年限的延长,土壤质量显著提高,表现为土壤物理性质和抗蚀性显著增强,化学性质显著提高,土壤微生物属性及活性显著增加。

2) 坡改梯作为黄土高原水土流失治理中广泛采用的一项主要工程措施,土壤质量可以反映该区域生态治理效果。结果表明采用工程技术进行坡改梯后,土壤经营和管理趋于科学化,土壤质量向良性方向发展。

[参 考 文 献]

- [1] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 131—134.
Zheng Zhaopei, Liu Zuoxin. Soil quality and its evaluation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 131—134. (in Chinese with English abstract)
- [2] Hartemink E A. Soil chemical and physical properties as indicator of sustainable land management under sugar cane in Papua[J]. New Guinea. Geoderma, 1998, 85(4): 283—306.
- [3] Wang X, Gong Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China[J]. Geoderma, 1998, 81(3): 339—355.
- [4] Arshad M A, Coen G M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7: 25—31.
- [5] Herrick J E. Soil quality: an indicator of sustainable land management[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 75—83.
- [6] 戴全厚, 刘国彬, 刘普灵, 等. 黄土丘陵区中尺度生态经济系统健康评价方法探索[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 990—998.
Dai Quanhou, Liu Guobin, Liu Puling, et al. Approach to health diagnoses of eco-economic system in mesoscale in loess hilly area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 990—998. (in Chinese with English abstract)
- [7] Hammad A H, Børresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(1): 39—47.
- [8] Zhang J H, Su Z A, Liu G C. Effects of terracing and agroforestry on soil and water loss in hilly areas of the Sichuan Basin[J]. China. Journal of Mountain Science, 2008, 5(3), 241—248.
- [9] Vancampenhout K, Nyssen J, Gebremichael D, et al. Stone bunds and soil conservation in the northern Ethiopian highlands: Impacts on soil fertility and crop yield [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1/2): 1—15.
- [10] 吴发启, 张玉斌, 宋娟丽, 等. 水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 28—31.
Wu Faqi, Zhang Yubin, Song Juanli, et al. Current state and development trend of research on environmental effect of level terrace[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(5): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [11] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. 水土保持学报, 1999, 5(3): 59—63.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess hilly region[J]. Journal of Soil Water Conservation, 1999, 5(3): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [12] 焦菊英, 王万中. 黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 59—63.
Jiao Juying, Wang Wanzhong. Quality and soil water conservation effectiveness of level terrace on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [13] 马福武, 贾志军. 晋西黄土丘陵沟壑区不同地类土壤水分变化规律研究[J]. 中国水土保持, 1998, (2): 26—28.
Ma Fuwu, Jia Zhijun. Study on variation of soil moisture in different types of lands in gullied and rolling loess region of northern Shanxi province[J]. Soil and Water Conservation In China, 1998, (2): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [14] Liu Guobin. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective[J]. Ambio, 1999, 28(8): 663—668.
- [15] Marriott C A, Hudson G, Hamilton D, et al. Spatial variability of soil total C and N and their stable isotopes in upland Scottish grassland[J]. Plant Soil, 1997, 196(1): 151—162.
- [16] 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, 1999.
- [17] Horwath W R, Paul E A. Microbial biomass//Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS, eds. Methods of Soil Analysis, Part 2-Microbiological and Biochemical Properties. Madison: American Society of Agronomy, 1994.
- [18] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [20] 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.
- [21] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 91—101.
Liu Guobin. Soil anti-scourability research and its perspectives in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation. 1997, 4(5): 91—101. (in Chinese with English abstract)
- [22] 中科院南京土壤研究所主编. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [23] 杨玉盛, 何宗明, 林光耀, 等. 不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究[J]. 水土保持学报, 1996, 2(2): 32—37.
Yang Yusheng, He Zongming, Lin Guangyao, et al. Effect of different control model on anti-erodibility of seriously deteriorated red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(2): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘进金. 土壤可蚀性之定性与定量[J]. 中华林学季刊, 1984, 17(1): 93—105.
Liu Jinjin. Qualitative and quantitative analysis of soil erodibility[J]. Journal of Chinese Forestry, 1984, 17(1): 93—105. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态. 水土保持科技情报[J]. 2001, 1(1): 36—39.
Ding Wenfeng, Li Zhanbin. Development on research for soil anti-erodibility[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2001, (1): 36—39. (in Chinese with English abstract)
- [26] Anderson T H, Dormsch K H. The metabolic quotient for CO₂ (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[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(3): 393–395.
- [27] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 等. 土壤微生物量及其生态效应[J]. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 45–51.
Wang Yan, Shen Qirong, Shi Ruihe, et al. Soil microbial biomass and its ecological effects[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1996, 19(4): 45–51. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 175–178.
Yang Wude, Wang Zhaoqian, Sui Guoping, et al. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2): 175–178. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17(6): 837–842.
- [30] Odum E. Trends expected in stressed ecosystems [J]. *Bioscience*, 1985, 35: 419–422.
- [31] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [32] 王书华, 毛汉英. 土地综合承载力指标体系设计及评价[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(3): 248–254.
Wang Shuhua, Mao Hanying. Design and evaluation on the indicator system of land comprehensive carrying capacity[J]. *Journal of Natural Resources*. 2001, 16(3): 248–254. (in Chinese with English abstract)

Effects of terracing slope cropland on soil quality in Hilly Region of Loess Plateau

Xue Sha^{1,2}, Liu Guobin^{1,2*}, Zhang Chao^{1,2}, Fan Liangxin^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;* 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China*)

Abstract: Terraces at different years in loess hilly region were chosen as subject to reveal changes in soil physico-chemical and biological properties after slope cropland was rebuilt to terraces. The results showed that slope cropland had a low content of physico-chemical and biological quality because of serious soil erosion and improper cultivation. Soil physico-chemical and biological properties had no remarkable change or a little drop in the first year of terracing under the action of soil disturbance and the reduction of erosion. Soil qualities (including of soil physical properties and anti-erodibility, chemical properties, microbial biomass and activity) were improved significantly with the terracing age. Soil quality index (SQI), integral indicator to reflect soil physico-chemical and biological properties, appeared linear increasing with years by regression analysis. In brief, when slope cropland was rebuilt to terrace, soil was managed scientifically and soil quality was significantly improved.

Key words: land consolidation, soil quality, terrace on slope cropland, loess hilly region.