

## 黄土高原生态系统演替进程中土壤有机质和 pH 值变化规律

杨世琦, 杨正礼

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要:**通过对黄土高原生态系统演替进程中土壤有机质和 pH 值变化进行分析, 结果表明: 在同一演替系列中, 随演替进程的推移, 土壤中有机质增加, pH 值减小; 在不同地段上, 演替高级阶段土壤的有机质高于低级阶段, pH 值正好相反; 人为间断干扰的生态系统土壤有机质下降, pH 值升高; 人为持续干扰的亚顶级生态系统土壤有机质明显降低, pH 值明显升高。

**关键词:**黄土高原; 生态系统演替; 有机质; pH 值

**中图分类号:** S153.621

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2008)02-0159-05

## The Changes of Soil Organic Matter and pH in the Course of Ecosystem Succession in the Loess Plateau

YANG Shi-qi, YANG Zheng-li

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The soil organic matter and pH value were analyzed in the course of ecosystem succession in the Loess Plateau. The results are: the soil organic matter increases and pH value decrease by succession process in the same series; the soil organic matter is higher in advanced stage than early stage, and pH value is lower in advanced stage than early stage; the soil organic matter decreases and pH value increase because of interrupted jamming, and the soil organic matter decreases distinctly and pH value increases distinctly in sub-climax ecosystem.

**Key words:** the Loess Plateau; ecosystem succession; organic matter; pH value

黄土高原是一个特殊的地理区域, 土壤退化问题突出, 主要表现为有机质含量降低、pH 值升高、土壤水分减少、出现土壤水分干层、水土流失严重, 养分减少向贫瘠化方向发展、初级生产力降低、生物多样性降低、植被稀疏和植被覆盖度降低等方面长期面对水土流失治理的困扰, 同时也长期面临植被恢复和改善环境的挑战。生态系统演替进程中, 土壤有机质含量和 pH 值变化能较好的指示生态系统发展优劣状态, 自然生态系统的群落演替土壤(0—100 cm)有机质增加, pH 值降低, 在植被恢复和环境治理中非常关注。通过总结近年对黄土高原生态林、灌丛和草本植被演替中的土壤有机质和 pH 值变化研究成果, 从演替系列、地段、人为干扰因素和顶级系统类型分析了有机质和 pH 值变化规律, 对黄土高原生态系统演替进程中土壤演替方向具有清楚的认识, 对黄土高原今后的植被恢复和自然环境建设具有重要启示。

### 1 黄土高原自然环境概况

黄土高原西起日月山, 东至太行山, 南靠秦岭, 北抵阴山, 涉及青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南 7 省(区) 50 个地(盟、州、市), 317 个县(旗、市、区), 全区总面积 64 万

km<sup>2</sup>, 土壤侵蚀模数大于 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 水土流失面积 45.4 万 km<sup>2</sup> (水蚀面积 33.7 万 km<sup>2</sup>, 风蚀面积 11.7 万 km<sup>2</sup>), 大于 1.5 t/(km<sup>2</sup>·a) 以上的剧烈水蚀面积占全国同类面积的 89%, 多沙粗沙区面积 7.86 万 km<sup>2</sup>。全区年均输入黄河泥沙 16 亿 t, 是我国乃至世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区。属季风气候区, 夏秋温暖多雨, 冬春寒冷干旱。年平均气温变化在 3.6~14.3℃ 之间, 极端低温为 -13.9℃~-38.2℃; ≥ 10℃ 的积温 771~4 800℃, 太阳总辐射能量在 5.0×10<sup>9</sup>~6.0×10<sup>9</sup> J/m<sup>2</sup> 之间。年平均降雨量变化在 184.8~750 mm 之间, 大多数地区为 300~600 mm, 7—9 月降水量约占全年降水总量的 60%, 温度和雨量呈现出由东南向西北递减的趋势。由东南向西北可依次划分为森林(落叶阔叶林)植被、森林草原植被、典型草原植被、荒漠草原植被、草原化荒漠植被 5 个植被地带。土壤主要有褐土、塬土、黑垆土、黄绵土、栗钙土、灰钙土、灰褐土、风沙土、盐碱土等。植被稀疏, 山、原、川三大地貌类型是黄土高原的主体。主要包括陇中高原、陕北高原、山西高原和渭河平原等。黄土高原耕地面积占全国的 1/7, 水资源总量仅为

收稿日期: 2007-05-22

基金项目: 中央级公益科研基金“农业环境演变及其修复研究”; 土壤有机质提升试点补助(2007A002)

作者简介: 杨世琦(1970—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事农业生态与环境保护研究。E-mail: shiqiyang@126.com

通信作者: 杨正礼。E-mail: yangzli@cjac.org.cn

全国的2%,流域内水资源的开发利用已达70%以上。森林面积仅为200万 $\text{hm}^2$ ,森林覆盖率不到5%,草场退化面积已达总面积的75%以上。目前有466.7万 $\text{hm}^2$ 坡耕地,其中25°以上的46万 $\text{hm}^2$ 。黄土高原多年平均降水量429 mm,相当全国年降水量的57%,为世界同纬度地区陆地年降水量(573 mm)的75%和亚洲年降水量(740 mm)的58%<sup>[1,2]</sup>。因此,黄土高原属于生态脆弱区和农业过负荷生产区域。

## 2 生态系统演替中土壤有机质和pH值变化分析

### 2.1 生态系统演替不同阶段土壤有机质和pH值变化

一般的演替过程研究土壤的任何层次,pH值都减少,深度越深,减少越少。演替过程中pH在演替初期减少较快,以后逐渐减慢。有许多工作证实了演替过程中pH值减少。除了pH对植物的直接作用外,有机酸减少,导致碳酸钙快速淋溶<sup>[3-7]</sup>。植被恢复也表现出同样的变化趋势。土壤pH对土壤元素转换和微生物区系有重要影响作用,影响元素对植物的有效性。

一般地,在植被的恢复过程中,土壤有机质、速效N、速效K、全N、表层速效P含量增加,土壤pH值和容重降低,氮的矿化能力增强,土壤微生物量明显提高,酶活性增加,水稳性团聚体数量和质量得到提高,土壤结构得到改善,土壤肥力得到提高,促进了土壤腐殖化和黏化过程的进行,土壤抗冲性和土壤抗剪强度得到强化,土地生产力得到提高,土壤水分状况得到改善<sup>[8-11]</sup>。陕北志丹县西阳湾(包括纸坊、旦八和永宁3乡)(36°49'N,108°43'E)从禾草草原群落、半灌木草原群落、灌丛草原群落到疏林草原群落,土壤含水量、有机质含量、全氮含量及表层速效磷含量逐渐提高,pH值逐渐降低。树林草原群落的有机质最高达到4.13%,平均达到1.6%左右,pH值最低7.54,比禾草草原群落pH值降低1.32<sup>[12]</sup>。

黄土高原森林边缘区(陕西省延安燕儿沟流域)退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化影响的研究结果表明,自然恢复期是退耕地养分消耗与累积处于平衡阶段,具有明显的过渡性。不同养分对植被恢复响应程度从高到低表现为:有效氮>有机质>全氮>速效钾>速效磷>全磷,土壤养分累积具有明显的表聚性,尤以有机质、全氮、有效氮和速效钾表现明显。各养分的相关性分析表明,土壤有机质、全氮、有效氮与速效钾相互间显著相关,而全磷和速效磷与其余各养分间的相关性较小,而且磷素养分在植被恢复过程中的变化较小。对植被演替进行人工调控,应充分认识养分变化的这种差异<sup>[13]</sup>。黄土高原森林草原区[陕西安塞县(109°2'92"-109°20'29"E,36°43'1"-37°8'61"N)]退耕地植被自然恢复过程与土壤养分变化研究结果类似<sup>[14]</sup>。

黄土丘陵沟壑区安塞县境内(105°51'44"-109°26'18"E,36°22'40"-36°32'16"N)退耕地自然恢复草地的演替过程中,土壤有机质、全氮、有效氮含量不断增加,土壤pH值和有效磷含量不断减小,土壤表层密度减小,孔隙度增大<sup>[15]</sup>。

黄土高原植被恢复过程中,能显著提高土壤有机质含量,促进土壤有机物质腐殖化过程,增加土壤有机质的表聚

性。相反,黄土高原植被破坏会显著降低土壤有机质的含量。在陕西省富县子午岭次生林区土壤侵蚀与生态环境观测站(109°11'E,36°05'N)对黄土高原子午岭林区植被破坏对土壤肥力影响的研究表明,随开垦年限增加,土壤有机质、氮含量显著减少<sup>[16]</sup>。林地被开垦耕种5 a后,表层20 cm土层有机质减少35.2%~72.2%,全N减少25.9%~51.1%,碱解N减少36.1%~61.5%,土壤肥力已不能满足作物生长的需要<sup>[17]</sup>;开垦耕种31 a的农地表层土壤养分含量与目前的黄绵土相似林地被开垦10 a后,耕层土壤中>0.25 mm水稳性团聚体含量较林草地降低了约54.0%~56.8%,耕地表层的稳渗速率较开垦前土壤入渗速率降低78.2%~81.8%<sup>[18]</sup>。

陕北黄土高原丘陵沟壑区的安塞县(105°51'44"-109°26'18"E,36°22'40"-36°32'16"N)的纸坊沟、县南沟、西沟、郭阳湾等不同流域,对黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复过程中的土壤水分变化规律研究结果表明,退耕年限增长,60 cm以下土层的土壤水分含量逐渐减少;不同地形条件的土壤含水量表现为阴坡>半阴坡>阳坡,坡下>坡中>坡上;不同植被类型土壤水分含量也不同,以草地土壤含水量最高,林地最小,灌木地介于两者之间;自然恢复的土壤水分含量相对较高,人工恢复的土壤水分含量相对较低,自然和人工相结合恢复介于两者之间;同一种植被类型,生物量越大,土壤水分含量越小<sup>[19]</sup>。

甘肃皋兰县中国科学院生态与农业试验站(36°13'N,103°47'E),海拔1780~1820 m。年均温度6.3℃,年降水量263 mm。选择黄土高原半干旱偏旱区2~20 a的弃耕地和天然台地,分析各样地0~100 cm土层土壤水分,12 a和20 a弃耕地土层含水量高于其它年份的弃耕地和天然台地,弃耕初期表层土壤含水量较高,天然台地含水量居中,但其植被对水分利用的时间延长,范围扩大,表明天然台地植被的水分利用率提高,植被群落趋于稳定。农田弃耕后植被沿天然植被方向演替,植物种类数量逐渐增加,第9年开始减少,20 a后接近于天然台地,弃耕初期的植被盖度和地上生物量显著大于弃耕12 a后和天然台地<sup>[20]</sup>。

黄土高原陕西省宜川铁龙湾林场(110°05'E,35°59'N)、富县任家台林场(109°09'E,36°05'N)、安塞县纸坊沟流域(109°16'E,36°44'N)和神木县六道沟流域(110°22'E,38°47'N)等地区黄土高原地区不同年限、不同植被立地土壤有机质含量的分析发现,刺槐、苜蓿、撂荒地土壤有机质含量随植被恢复年限的增加而增大;安塞土壤有机质含量随植被逐渐乔木化而增大;0~60 cm土层土壤有机质含量随深度的增加而减小;坡面表层土壤有机质分布曲线类似于一个周期的“正弦曲线”或“反弦曲线”,但植被生长较好的坡面例外;土壤有机质受地理位置的影响,随纬度的北移而减小,其顺序为:富县>宜川>安塞>神木<sup>[21]</sup>。

宁夏固原上黄生态试验站(106°26'-106°30'E,35°59'-36°02'N)。年降水量420 mm,年均气温7℃,干燥度1.55~2.0。土地坡度在15~20°。土壤为黄绵土。18 a灌木林(柠条)地pH值0~20 cm和20~40 cm(8.03,7.79)<8 a

生林地(8.07, 8.01) < 对照耕地(8.11, 8.16), 土壤有机质 18 a 生林地 0—20 cm 和 20—40 cm(17.97, 9.93) < 8 a 生林地(16.37, 9.83) < 对照耕地(8.53, 7.50)。明显提高土壤中有机质、速效氮和速效钾的含量, 降低土壤 pH, 快速显著地增加土体中 > 5 mm 水稳性团聚体和 > 0.01 mm 微团粒的数量, 使土壤的营养状况及结构得到很大改善, 防止土地退化和保护生态环境<sup>[22]</sup>。

陕西省永寿县马莲滩林场试验研究表明了黄土高原半湿润地区恢复植被能够显著提高土壤有机质含量, 且草地 > 沙棘 > 黄刺玫 > 油松, 土壤有机质的提高效益随深度增加而明显减小, 土壤有机质有一定表聚性, 草地和灌木林植被下更为显著<sup>[23]</sup>。

## 2.2 不同地段上的生态系统演替土壤有机质和 pH 值比较

在生态系统不同群落及不同地段上, 对森林(乔木)、草原(草本)和农田的比较研究中发现, 土壤有机质含量降低, pH 值增加; 同一类型生态系统, 演替阶段递进也表现出同样的规律; 混和林地土壤比纯林土壤的有机质含量高, pH 值增加。

从黄土高原不同地域(由北向南依次为神木、安塞、富县、洛川、杨陵)分别采取不同植被(林地、草地、农田)条件下 0—20, 20—40 和 40—60 cm 土层土样。在不同植被下有机质(g/kg)和全氮含量表现为自然林地(24.30, 1.05) > 裸地(20.32, 0.979) > 人工林地(13.99, 0.66) > 农地(12.16, 0.616)<sup>[24]</sup>。

黄土丘陵沟壑区子午岭次生林区甘肃省合水县连家砭林场(36°03′—36°05′N, 108°31′—108°32′E), 研究不同植被覆盖对土壤养分状况的影响。结果表明: 不同植被类型覆盖下, 土壤有机质含量为乔木 > 灌木 > 草本 > 农田 > 弃耕地。土壤全氮含量为乔木 > 草本 > 灌木 > 农田 > 弃耕地; 全磷含量变化不大, 其中农田土壤全磷含量最高; 全钾含量为乔木 > 灌木 > 草本 > 农田 > 弃耕地; 土壤碱解氮含量为乔木 > 灌木 ≈ 草本 > 农田 > 弃耕地; 速效磷含量为乔木 ≈ 灌木 ≈ 农田 > 草本 > 弃耕地; 速效钾含量为乔木 > 草本 > 灌木 > 农田 > 弃耕地。由此可见, 随植被演替阶段的提高, 不同植被覆盖下土壤的养分含量逐渐升高<sup>[25]</sup>。

土壤阳离子交换量(CEC)是反映土壤胶体上负电荷的多少和对阳离子性养分离子吸附能力的大小, 土壤阳离子交换量与土壤有机质及黏粒含量等有关, 有机质含量高, CEC 随之升高<sup>[26]</sup>。林地土壤 0—100 cm 层次土壤 CEC 与荒地相比, 均有所升高, 其中混交林地较荒地增加 14.03%<sup>[27]</sup>。不同林型之间, 土壤 CEC 含量以侧柏—刺槐混交林地最高, 侧柏林地次之, 刺槐林地最低。同时, 阳离子交换量(CEC)反映了土壤保肥能力的强弱, CEC 越大, 土壤交替表面负电荷越多, 吸附保持阳离子养分的能力越强。随着林龄的增长, CEC 的变化趋势为各土层成龄林土壤均大于其幼龄林土壤, 表层土壤大于深层土壤<sup>[28]</sup>。

陕西耀县柳林林场(35°00′—35°20′N, 108°45′—108°55′E)分别选定立地条件相近的 42, 32, 24, 22, 17 和 12 a 生油松纯林样地 6 块及撂荒地 1 块(CK)进行试验。海拔 850—

1 734 m, 年均温度 12.5℃, ≥10℃ 的活动积温 2 929℃, 年降水量 571 mm, 土壤以碳酸盐褐土、普通褐土和褐土型粗骨土为主, 土层厚度约为 1 m。42, 32, 24, 22, 17 和 12 a 生油松纯林林地土壤 pH 值的平均为 8.27, 8.43, 8.35, 8.22, 8.15 和 8.18。不同树龄油松纯林林地 10, 20, 30, 50, 70 和 90 cm 土层土壤平均 pH 值分别为 7.76, 7.98, 8.44, 8.54, 8.50 和 8.48。42, 32, 24, 22, 17 和 12 a 生油松纯林林地平均土壤有机质值分别为 13.0, 12.5, 12.0, 18.8, 23.8 和 8.6 g/kg。不同树龄油松纯林林地 10, 20, 30, 50, 70 和 90 cm 土层平均土壤有机质含量分别为 45.0, 24.8, 7.7, 4.8, 3.4 和 3.2 g/kg。油松林地土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量及 pH 值随树龄增加无确定的变化规律; 土壤全磷含量随树龄增加按幂函数衰减; 土壤交换性钙含量和交换性盐基总量随树龄增加按 Logistic 模型变化; 交换性镁含量随树龄增加按幂函数递增; 油松林地土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量随土壤深度的增加按幂函数衰减, 土壤全磷、交换性钙和交换性镁含量及交换性盐基总量随土壤深度增加无确定变化规律, 但土壤 pH 值随深度增加按幂函数增加。与撂荒地相比, 油松林地土壤有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、交换性钙、交换性镁含量及交换性盐基总量分别增加了 46.4%~317.9%, 18.7%~234.5%, 174.8%~290.3%, 19.7%~53.3%, 0.6%~54.7%, 74.1%~102.6%, 6.0%~47.1% 和 83.7%~114.2%, 速效钾则出现了表面富集化现象, 表明油松林能够有效改善土壤养分状况<sup>[29]</sup>。

陕西省永寿县马莲滩林场试验研究表明不同林型植被, 土壤的腐殖化作用有明显差异, 土壤有机质、各营养元素和阳离子交换量增加各不相同, 除了全钾、速效磷以外, 表现为刺槐侧柏混交林地 > 刺槐林地 > 侧柏林地 > 荒地。固氮树种与非固氮树种混交栽植对土壤肥力质量的提高较纯林栽植效果显著<sup>[27]</sup>。

陕西省横山县(36°31′—37°20′N, 108°52′—109°26′E)年均降水 562 mm, 年均气温为 8.6℃。土壤以黄绵土为主, 有机质含量小于 1%。两流域尺度研究表明, 在小流域和县域尺度(小流域采样数少, 县域采样数多)上, pH 值菜地(8.5, 8.4), 草地(8.5, 8.2), 灌丛(8.7, 8.2), 林地(8.6, 8.4)<sup>[30]</sup>。

## 2.3 人为间断干扰条件下生态系统土壤有机质和 pH 变化

陕西省永寿县马莲滩林场和槐坪林场(34°48′00″—34°48′21″N, 108°05′27″—108°05′50″E), 海拔 1 230—1 370 mm, 年均温度 10.8℃, 年均降水量 601.6 mm, 干旱指数 1.73~1.8, 成龄油松林和刺槐林 44 a, 具有良好的生态景观。幼龄油松林和幼龄刺槐林的土壤的 pH 值变化不大, 而成龄林土壤的 pH 值则显著降低。0—20 cm 和 20—100 cm 的撂荒地 pH 值分别为 8.08 和 8.23; 幼龄油松林分别为 8.05 和 8.2; 幼龄刺槐林分别为 8.16 和 8.32; 成林油松林分别为 7.26 和 7.75; 成林刺槐林分别为 6.8 和 8.07。刺槐比油松林降低幅度大, 主要由于土壤 pH 值受有机质含量的影响较大, 刺槐林土壤有机质含量提高的幅度远大于油松林, 同时油松林土壤中的钾含量高, 也提高了油松林土壤的 pH

值<sup>[28]</sup>。另一试验研究表明,不同树种根区土壤 pH 值、碳酸钙、全磷及速效钾差异很小。沙棘+侧柏林、沙棘、侧柏及沙棘-侧柏过渡点的剖面 pH 值分别为 8.56, 8.58, 8.60<sup>[31]</sup>。

黄土高原中部的陕西省旬邑县东北部马栏林区(108°27′-108°52′E, 35°9′-35°33′N), 主脉属于午岭南端, 年平均气温 7℃, ≥0℃积温 3 134℃; 年降水量 630 mm、海拔 1 000~1 700 m, 成土母质为风积黄土, 土壤有机质含量 1.5%~2.3%, pH 值 7~9<sup>[32]</sup>。

陕西省宜川县铁龙湾林场 1995-2000 年, 该处位于黄龙山北缘, 海拔 1 200 m, 年平均温度 9.8℃, 年降水量 574.4 mm, 土壤为灰褐色森林土, 地带性植被为落叶阔叶林。油松人工林为 1963 年建造, 分布于山坡东、北、西北向的中上部, 坡度 20~25°, 初植密度 6 000 株/hm<sup>2</sup>, 1983 年和 1992 年曾两次进行间伐, 纯林密度现为 1 800 株/hm<sup>2</sup>, 郁闭度 0.7~0.8。林下有灌木零星分布, 主要有黄刺玫、忍冬等, 盖度 0.2。草本植物有大披针叶苔草、铁杆蒿等, 盖度 0.4。枯枝落叶层厚 2~3 cm。研究结果表明: 0~10 cm 土壤中, 人工油松林 pH 为 8.3, 农地为 8.5; 有机质分别为 2.83% 和 1.23%, 容重分别为 0.96 和 1.05 g/cm<sup>3</sup>, 全 N 0.14% 和 0.076%; 全 P 0.061% 和 0.104%; 全钾为 2.64% 和 2.65%; 阳离子代换量 11.72 和 7.65, 小于 0.001 mm 土粒百分数 13.6% 和 11.5%, 小于 0.01 土粒百分数 34.4% 和 33.1%<sup>[33]</sup>。

陕西省富县大麦秸沟(35°59′N, 108°41′E), 位于黄土高原子午岭林区, 年均温度 9℃, ≥10℃的积温 2 800℃, 年均降水量 600 mm。海拔 1 200~1 450 m, 坡度 10~70°, 土壤灰褐色森林土, 枯枝落叶层厚度局部地段可达 5~10 cm, pH 值 7.9, 由表层至深层逐渐增大。土壤腐殖质含量在 3.6%~7.5%, 土壤含氮 0.10%~0.22%。林内柴松生长茂盛, 天然更新良好<sup>[34]</sup>。

甘肃省永靖县北部黑方台(36°05′N, 103°16′E), 属于黄河北岸 4 级阶地。海拔 1 700~1 740 m。年均降水量 316 mm, 年蒸发量 1 689 mm。采集自然土壤的非扰动土作为供试土壤, 其平均容重为 1.32 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水量  $6.4 \times 10^{-2}$  g/cm<sup>3</sup> 表示, pH 值 7.9, CaCO<sub>3</sub> 含量为 261.0 g/kg, 粒级组成为砂粒 64.5 g/kg, 粉粒 773.5 g/kg, 黏粒 162.0 g/kg, 属粉砂质黏壤土。研究表明碳酸钙大约参与了 99% 的团粒形成, 团粒越大, 碳酸钙含量越多, 表明黄土团粒的主要胶结物是碳酸钙<sup>[35]</sup>。

#### 2.4 人为持续干扰条件下亚顶级生态系统土壤有机质和 pH 值变化

人类活动对土壤特性变异也有较大影响。农业生产中的施肥(化肥或有机肥)、作物品种、灌溉及其它的一些生产管理措施都是使土壤特性产生较大变异的因素。作物对养分的吸收、养分本身在土壤剖面中的淋洗及土壤酸碱调节剂的应用都会引起土壤特性的空间变异。

黄土高原中部子午岭林区南端的甘肃省正宁县中湾林场(108°27′E, 35°17′N), 海拔 1 246~1 756 m, 年均气温 8.3℃, 年降水量 623.5 mm, 年蒸发量 1 500.8 mm, 干燥度

0.97。地带性土壤为灰褐色森林土, 残落物层一般 2~4 cm, 腐殖质层厚度约 10~15 cm, 土壤疏松多孔, 有机质含量为 2.57%~4.28%。土壤 pH 值 6.8~8.5。增加人为干扰, 土壤粗骨化, 水稳性团粒结构含量下降, 土壤容重增加, 孔隙度下降, 土壤水和有机质降低<sup>[36]</sup>。

黄土高原半干旱丘陵沟壑区的山西偏关县(39°12′56″-39°39′88″N, 111°21′2″-112°0′48″E), 主要造林树种为油松和柠条, 还有沙打旺等根系发达、耐干旱瘠薄、抗风沙的人工牧草。海拔 1 250 m, 黄绵土型、间有灰褐土、土质松散、贫瘠。在放牧条件下土壤有机质含量 0.29%, pH 值为 7.5<sup>[37]</sup>。

兰州大学庆阳黄土高原试验站(35°41′N, 107°51′E), 海拔 1 297 m, 年均温度 8.3℃, 年均降水量 562 mm, 年均蒸发量 1 504 mm。土壤为黑垆土, 在秸秆覆盖保护性耕作技术条件下, 3 a 土壤有机质没有增加, pH 值 8~8.5<sup>[38]</sup>。

黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村旱塬上, 土壤为黄盖黏黑垆土, 海拔 1 200 m, 年均降雨 578.5 mm, >10℃积温 3 029℃, 年均气温 9.1℃。1984 年试验时耕层土壤有机质含量为 10.5 g/kg, 全氮含量为 0.57 g/kg, 碱解氮含量为 37.0 mg/kg, 全磷含量为 0.659 g/kg, 有效磷含量为 3.0 mg/kg, 速效钾含量为 129.3 mg/kg, pH 值 8.1~8.3。长期单施有机肥和氮磷配合明显提高耕层土壤有机质, 而单施氮肥和磷肥提高不明显<sup>[39]</sup>。

### 3 讨论

黄土高原生态系统演替进程中土壤有机质和 pH 值变化规律表明, 在自然演替条件下, 土壤有机质增加, pH 值降低, 生态系统趋于良性, 植被稳定; 在人为干扰条件下, 有机质减少, pH 升高, 生态系统趋于退化, 植被减少, 覆盖度降低; 对于亚顶级生态系统(农田、人工林地和草地)只有保持一定的投入, 才能维持生态系统的稳定, 但在很多情况下增加了水土流失。因此, 对于黄土高原退耕还林还草, 应该注重自然恢复, 尽量减少认为影响和干扰, 才能促进植被较快的恢复。

#### 参考文献:

- [1] 刘秉正, 吴发启. 黄土高原经济林(果)建设与开发[M]. 北京: 黄河水利出版社, 2003: 34-35.
- [2] 杨文杰, 吴发启, 方丽. 陕西省渭北黄土高原苹果发展战略研究[J]. 西北农业学报, 2004, 13 (3): 158-161.
- [3] Crocker R L, Major J. Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay Alaska[J]. J. Ecol., 1955, 43: 427-448.
- [4] Crocker R L, Dickson D A. Soil development on the recessional moraines of the Herbert and Mendenhall glaciers, southeastern Alaska[J]. J. Ecol., 1957, 45: 169-185.
- [5] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrification potentials in primary and secondary succession[J]. Ecology, 1981, 62: 376-386.
- [6] Viereck L. Plant succession and soil development, on

- gravel outwash of the Muldron Glacier, Alaska[J]. Ecol. Monogr., 1966, 36(3):181-199.
- [7] 张全发, 郑重, 金义兴. 植物群落演替与土壤发展之间的关系[J]. 武汉植物学研究, 1990, 3(4):325-334.
- [8] 常庆瑞, 安韶山, 刘京, 等. 黄土高原恢复植被防止土地退化效益研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4):40-44.
- [9] 董林根, 林国坚, 等. 低丘生态脆弱区植被恢复与经济发展研究[J]. 浙江林业科技, 1998, 18(3):1-7.
- [10] 杜凌. 林草结合恢复植被试验报告[J]. 贵州林业科技, 1996, 24(4):21-26.
- [11] 盛才余, 刘伦辉, 刘文耀. 云南南涧干热退化山地植被恢复初期生物量及土壤环境动态[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5):575-580.
- [12] 赵广琦, 杜增平. 陕北西阳湾植被恢复的特点初探[J]. 西北林学院学报, 2002, 17(2):10-13.
- [13] 温仲明, 焦峰, 赫晓慧, 等. 黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(1):16-23.
- [14] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2025-2029.
- [15] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):15-22.
- [16] 张锋, 郑粉莉, 安韶山, 等. 子午岭地区林地破坏加速侵蚀对土壤养分流失和微生物的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6):826-833.
- [17] 郑粉莉, 张成娥. 林地开垦后坡面侵蚀过程与土壤养分流失的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):44-461.
- [18] 查轩, 黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响[J]. 山地学报, 2001, 19(2):109-114.
- [19] 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5):19-23.
- [20] 魏兴琥, 谢忠奎, 段争虎. 黄土高原西部弃耕地植被恢复与土壤水分调控研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4):590-595.
- [21] 薛晓辉, 卢芳, 张兴昌. 陕北黄土高原土壤有机质分布研究[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2005, 33(6):69-74.
- [22] 安韶山, 黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(1):70-74.
- [23] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):38-41.
- [24] 刘毅, 李世清, 邵明安. 黄土高原不同土壤结构体有机碳库的分布[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3):1003-1008.
- [25] 张红, 吕家珑, 赵世伟. 不同植被覆盖下子午岭土壤养分状况研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2):66-69.
- [26] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3):901-913.
- [27] 张静, 常庆瑞. 渭北黄土高原不同林型植被对土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3):26-29.
- [28] 郑顺安, 常庆瑞. 黄土高原不同类型人工林对土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2):119-123.
- [29] 耿增超, 张社奇, 王国栋, 等. 黄土高原油松人工林地土壤养分及化学性质的时空效应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8):98-105.
- [30] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析: 以横山县为例[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):105-108.
- [31] 郑顺安, 常庆瑞. 黄土高原不同类型人工林对土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2):119-123.
- [32] 董建辉, 薛泉宏, 张建昌, 等. 黄土高原人工混交林土壤肥力及混交效应研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3):31-35.
- [33] 孙晓霞, 王孝安, 郭华, 等. 黄土高原马栏林区植物群落的多元分析与环境解释[J]. 西北植物学报, 2006, 26(1):150-156.
- [33] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应[J]. 生态学报, 2003, 23(2):376-379.
- [34] 王凯博, 上官周平. 黄土高原子午岭天然柴松林种群结构与动态研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12):2553-2559.
- [35] 郭玉文, 加藤诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3):362-370.
- [36] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11):3685-3695.
- [37] 范春梅, 廖超英, 李培玉, 等. 放牧对黄土高原丘陵沟壑区林草地土壤理化性状的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2):1-4.
- [38] 樊丽琴, 南志标, 沈禹颖, 等. 保护性耕作对黄土高原小麦田土壤微生物量碳的影响[J]. 草原与草坪, 2005(4):51-54.
- [39] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2):230-235.