

# 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质

李强<sup>1</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>, 许明祥<sup>1,2</sup>, 张正<sup>1</sup>, 孙会<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水利部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, 杨凌 712100;  
2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院安塞水土保持综合试验站, 安塞 717400)

**摘要:** 为了评价农地撂荒对土壤抗侵蚀性的影响, 该文以黄土丘陵区自然撂荒地作为研究对象, 应用时空互代法, 通过原状土冲刷试验对不同撂荒阶段(0~43 a)的坡地土壤抗冲性进行了研究。结果表明: 与对照(阶段)相比, 随着撂荒年限的增加, 表层(0~15 cm)和深层(>15~30 cm)土壤容重显著降低, 而下层(>30~50 cm)土壤容重变化较小(约下降 0.5%)。土壤团聚体和抗剪强度(黏聚力 C 和内摩擦角  $\phi$ ) 在 3 个土层中均呈显著增加趋势, 而土壤崩解速率在 3 个土层中均呈下降趋势, 与表层相比, 中层和下层土壤崩解速率减小幅度更大(约 4.2 和 1.8 倍)。土壤抗冲性随着撂荒年限的增大在表层呈先增加后稳定的趋势, 在中层呈稳定增加而下层无显著变化, 与对照相比, 中层和下层土壤抗冲系数分别平均增大 76.9%和 30.7%。土壤团聚体和根系密度在 3 个土层中均是影响土壤抗冲性的关键因子。研究结果从土壤抗侵蚀性的角度为退耕还林工程的生态功能评价提供理论依据。

**关键词:** 土壤, 物理性质, 侵蚀, 撂荒地, 根系, 土壤抗冲性, 黄土丘陵区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.10.021

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-10-0153-07

李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153 - 159.

Li Qiang, Liu Guobin, Xu Mingxiang, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(10): 153 - 159. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

黄土丘陵区地形破碎, 土壤结构疏松, 是中国水土流失严重的地区之一, 也是国家退耕还林还草及生态建设的重点区域。近年来开展的生态建设和退耕还林生态工程极大地改善了区域生态环境<sup>[1-3]</sup>。该区坡地退耕方式主要包括还林、还草和自然撂荒 3 种, 其中自然撂荒是人为扰动最少的一种处理方式, 自然撂荒地可占研究区土地面积的 8%, 对区域生态环境建设具有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。

土壤抗冲性是指土壤抵抗外力机械破坏作用的能力, 是土壤抗侵蚀性能的重要方面<sup>[6]</sup>。早在 60 年代初, 朱显谟院士针对黄土高原土壤侵蚀的特征及研究结果, 就提出“土壤抗冲性”的概念, 并指出, 土壤抗冲性的研究将是揭示黄土高原土壤侵蚀规律的关键, 而植物根系提高土壤的抗冲性能是植

被保持水土机理研究中的核心问题之一<sup>[7-8]</sup>。先后有研究认为恢复和重建生态环境研究中的一个重要内容就是根系对土壤结构稳定性和增强土壤抗冲性的作用机制<sup>[9-11]</sup>。这方面的研究在不同土地利用方式和土壤类型上均得到验证<sup>[12-14]</sup>, 但关于黄土高原不同撂荒阶段下根系对土壤稳定性及其在防止水蚀中的重要性研究较少, 而这方面的研究对于科学评价植被恢复的土壤环境效应、揭示植被水土保持机理以及土壤质量演变规律有重要意义<sup>[1,15]</sup>。

因此, 本文以黄土丘陵区自然撂荒地作为研究对象, 运用时空互代法, 通过测定土壤容重、土壤抗剪强度、土壤团聚体含量和崩解速率等物理指标, 结合原状土抗冲试验对不同撂荒阶段(0~43 a)的撂荒地土壤物理性质及抗冲性进行了研究。以期从土壤抗侵蚀性的角度为研究区退耕还林工程的生态功能评价提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持实验站的墩山(109°19'23"E, 36°51'30"N), 多年平均降雨量为 505.3 mm, 但年际变化大且年内分配不均, 其中 60%以上集中于 7~9 月。地形破碎, 沟壑纵

收稿日期: 2012-09-15 修订日期: 2013-03-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300)

作者简介: 李强(1986-), 男, 陕西子洲人, 博士生。主要研究方向: 侵蚀土壤质量演变及管理。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: liqiang1011@gmail.com

通信作者: 刘国彬(1958-), 男, 博士, 陕西榆林人, 研究员, 主要从事流域生态系统管理研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: gblu@ms.iswc.ac.cn

横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,亦为典型的侵蚀环境。土壤为黄土母质上发育的黄绵土,抗冲抗蚀能力差,水土流失严重;土壤质地类型为粉砂壤土,砂粒(2.00~0.05 mm)质量分数占19.0%,粉粒(0.05~0.02 mm)质量分数占65.2%,黏粒(<0.02 mm)质量分数占15.8%。耕层土壤容重1.15~1.35 g/cm<sup>3</sup>,pH值8.4~8.6,有机质质量分数3.5~4.8 g/kg。

表1 样地基本特征

Table 1 Description of sampling plots

撙荒阶段 Stage	年限 Year/a	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	草本类型 Grass type
0		N	19	1205	糜子 <i>Panicum miliaceum</i>
10		NW45°	20	1276	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
22		NW30°	24	1238	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisiamelinii</i> <i>web.ex.stec-Stipa bungeana</i>
34		NE45°	21	1277	铁杆蒿-长芒草 <i>Artemisiamelinii</i> <i>web.ex.stec-Stipa bungeana</i>
43		S	27	1232	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum(L.)Keng</i>

## 1.2 样地选择和样品采集

应用时空互代法,在流域内选择地貌特征、植被以及土地利用状况及坡度、坡向相似,长势比较均匀且年限跨度较大的撙荒地作为研究样地(表1)。这种方法虽然无法保证不同时空、气候等外界环境恒定,但是却可以通过一次同时采集不同生长年限样地的样本来取得较长时间尺度的研究结果,是生态学领域中普遍采用的方法<sup>[16]</sup>。因此,第V阶段的样地选择从时空互代法的角度出发存在不足。但本研究中,由于采样流域内撙荒35 a以上的阴坡样地很少,存在的部分遭破坏,不适合样品采集。为了系统地研究撙荒过程对土壤抗冲性的影响,依据撙荒年限的影响要大于坡向等环境因子对土壤性质的影响,本文选择了该样地<sup>[17-18]</sup>。在黄土高原地区,坡面土壤侵蚀以细沟和浅沟侵蚀为主,而浅沟侵蚀的侵蚀深度在该区定义为50 cm<sup>[8]</sup>。因此土壤抗冲性指标的获取采用原状土冲刷法,在所选择地内随机挖2个60 cm深的土壤剖面,并去除地上部植物及枯枝落叶物,用20 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)的特制取样器自上而下取表层(0~15 cm)、中层(>15~30 cm)和下层(>30~50 cm)取原状土样,每层2个重复。为了减少采样过程对土壤的扰动,本研究选择雨后第2~4天进行样品采集,此时采样及运输对土壤样品扰动最小。同时,在取样器上方垫以结实木块,用皮锤将取样器顺坡垂直砸

下。然后,铲掉取样器周边土壤,将取样器完整取出,用剖面刀沿取样器底部将土样削平后垫上带小孔铝制底片,再用保鲜膜密封,尽力避免土样流失,除此,在搬运取样器过程中,将带有铝制底片的一端朝下,保持取样器内土样完整。

## 1.3 室内冲刷及指标测定

将带回的取样器连同铝制底片置于水盘中,水面高度为5 cm,水从铝制底片小孔自下而上浸润土壤12 h直至达到饱和。然后,将饱和的原状土轻轻置于铁架台上8 h去除土壤重力水后进行抗冲试验,试验冲刷槽尺寸为2 m×0.1 m(长×宽),坡度为15°,用当地标准径流小区(20 m×5 m)产生的最大径流量来计算单位流量为冲刷流量,即4.0 L/min,经校正后冲刷流量为4.03 L/min,校正流速为0.97 m/s。冲刷时间为15 min,自产流后的前3 min用取样桶每1 min收集1次水流泥沙样,随后每2 min收集1次径流,共取9次样。冲刷结束后称量各个桶内的径流泥沙量,然后将塑料桶静置澄清,泥沙沉淀完全后倒掉上层清液,剩余泥水样转移至铁盒内,置于烘箱中105 °C烘干并测定泥沙质量(g)。在本试验过程中部分取样器的土壤因水流冲刷作用发生垂直穿透现象,当土壤被穿透立即停止冲刷。抗冲系数计算(公式1)为每冲刷掉1 g的烘干土所需水量,用AS(anti-scourability)表示(L/g),AS愈大,土壤的抗冲性愈强。

$$AS = \frac{f \times t}{W} \quad (1)$$

式中, $f$ 为冲刷流量,L/min; $t$ 为冲刷时间,min; $W$ 烘干泥沙质量,g。

植物根系生物量的获取是将做完抗冲试验的土体在筛网上反复冲洗,将土壤中所有的根系洗出,置入80 °C烘箱中,烘干至恒定质量,g,再分别称其质量并记录。根系密度用RD(root density)(kg/m<sup>3</sup>)表示,计算采用公式(2)

$$RD = \frac{M_D}{V} \quad (2)$$

式中, $M_D$ 为根系烘干质量,kg; $V$ 为采样器体积,m<sup>3</sup>。

土壤容重采用环刀法测定。土壤水稳性团聚体采用沙维诺夫湿筛法测定<sup>[19]</sup>。土壤剪切力采用南京土壤仪器厂有限公司制造的ZJ-1型大型直接剪切仪。直剪试验的剪切速率为0.8 mm/min,分别施加100、200、300和400 kPa 4种垂直压力,量力环率定系数分别为1.784、1.703、1.799和1.793。土壤黏聚力 $C$ 和内摩擦角 $\phi$ 的计算采用库伦定律<sup>[20]</sup>。土壤崩解速率(cm<sup>3</sup>/min)计算采用蒋定生等设计的浮筒法原理<sup>[21]</sup>。试验观测时间为30 min,其计算采用

公式 (3)

$$v = a \frac{l_0 - l_t}{t} \quad (3)$$

式中,  $v$  为单位时间内所崩解的试样体积,  $\text{cm}^3/\text{min}$ ;  $l_0$  为试样浸入水中时浮筒的起始读数;  $l_t$  为试样完全崩解时或第 30 分钟时的浮筒读数;  $t$  为试样完全崩解时的时间或者是土样未崩解完的第 30 分钟时间;  $a$  为体积换算系数, 本测试装置的  $a$  为 1.276。

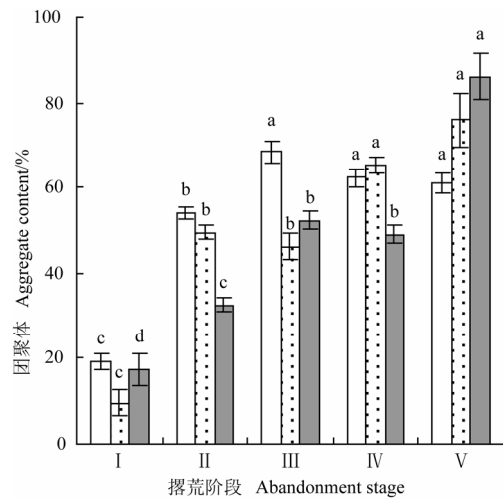
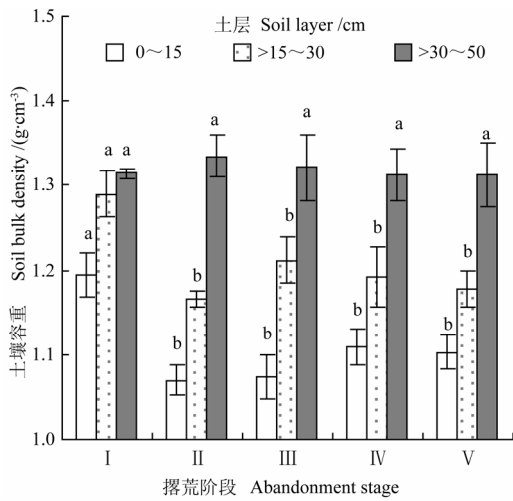
### 1.4 数据统计分析

数据分析采用 SPSS 15.0 统计软件, 差异显著性检验采用 LSD 法 ( $p < 0.05$ , 双尾)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同撂荒阶段土壤物理性质及根系密度的变化

从图 1a 可以看出, 随着撂荒年限的增加, 与对照(阶段 I)相比, 表层(0~15 cm)、中层(>15~30 cm)土壤容重显著下降, 平均下降 8.9%和 8.0%, 而下层土壤(>30~50 cm)容重变化较小, 约下降 0.5%。这可能是由于坡耕地撂荒后上层土壤人为扰动减少, 加之植物根系的网络串联作用和生物化学作用促进土壤团粒的形成, 疏松土壤和增加了土壤孔隙度, 使得土壤容重随着撂荒年限发生显著下降。而下层根系对土壤影响较弱, 土壤容重变化较小<sup>[22-23]</sup>。



a. 土壤容重  
a. Soil bulk density  
b. 团聚体含量  
b. Soil aggregation content

注: 不同字母表示同一土层不同阶段差异显著。、 、 、 、 分别表示撂荒 0、10、22、34 和 43 年, 下同。  
Note: Different letters indicate significant difference among stages in the same soil layer. , , , and denote land abandonment for 0, 10, 22, 34 and 43 years, respectively, the same as below.

图 1 不同撂荒阶段土壤容重和团聚体含量变化

Fig.1 Soil bulk density and soil aggregation content during different abandonment stages

土壤水稳性团聚体是反映土壤抵抗水力分散的能力, 是土壤抗侵蚀性的评价指标之一<sup>[24]</sup>。在撂荒前期(阶段 I), 表层土壤水稳性团聚体增加较快, 而后趋于稳定, 与对照相比, 阶段 II、III、IV 和阶段 V 的团聚体含量分别增加了 180%、256%、224%和 218%, 平均增加 220%。中层和下层土壤团聚体含量随着撂荒时间的增加均呈阶梯式增加趋势(图 1b)。

土壤抗剪强度从土壤侵蚀的角度来讲是指在剪应力的作用下, 土壤颗粒或土壤团粒因持续剪切而引起的剪切变形及变形破坏的阻力<sup>[24]</sup>。土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\phi$  是土壤抗剪强度的表征参数。通常情况下,  $C$  和  $\phi$  数值越大, 土壤颗粒内部及颗粒间的凝聚力和摩擦力就越大, 土壤抗冲性越强<sup>[25]</sup>。党进谦等<sup>[26]</sup>对黄绵土研究发现不同水分梯度主要影响黏聚力  $C$ , 对内摩擦角  $\phi$  影响较小。本研究土

壤水分变异较小(表 2), 所以, 测定抗剪强度时采用了非扰动土试验。从表 2 可以看出, 随着撂荒年限的增加, 与对照相比, 表层土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\phi$  均呈不同程度的增加趋势, 增幅分别为 75%~200%和 17.3%~42.0%, 平均增大 190.6%和 23.7%。中层土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\phi$  与对照相比也呈较大的增加趋势, 而下层土壤黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\phi$  变化较小。

土壤崩解是指土壤在水中发生分散、碎裂、塌落或强度减弱的现象。土壤崩解强度越大, 意味着土壤在水中被分散、碎裂、塌落得越快, 给径流提供的松散物质就越多, 产生土壤侵蚀的几率就越大。土壤崩解强度一般用土壤崩解速率表示。随着撂荒年限的增加, 与对照相比, 土壤崩解速率在 3 个土层中均呈下降趋势, 与表层相比, 中层和下层土壤的崩解速率变化更大(图 2a)。

表 2 不同撂荒阶段土壤抗剪强度的变化  
Table 2 Soil shear strength during different abandonment stages

撂荒阶段 Abandonment stage	表层 Surface layer (0 ~ 15 cm)			中层 Middle layer (> 15 ~ 30 cm)			下层 Lower layer (> 30 ~ 50 cm)		
	含水率 Soil moisture/%	C/kPa	$\phi/(\circ)$	含水率 Soil moisture/%	C/kPa	$\phi/(\circ)$	含水率 Soil Moisture/%	C/kPa	$\phi/(\circ)$
	11	2	24.4	11.7	1	25.9	14.1	7	30.7
	14.1	7.8	28.9	14.2	1	30.1	16	4.5	32
	16.19	3.5	34.7	14.91	4.3	30.3	18	7.8	28.3
	16.8	6	28.6	14.6	9.5	32.1	16.6	5.5	29.8
	15.1	6	28.6	17.4	15	34	18.1	5.5	29.8
变异系数 Variable coefficient C.V/%	15.6	45.4	12.6	13.9	98.1	9.9	9.9	21.8	4.5

注：C和 $\phi$ 分别是土壤黏聚力和摩擦角。

Note: C and  $\phi$  are soil cohesion and angle of internal friction.

植物根系能够通过网络串联、根土粘结和生物化学作用强化土壤抗冲性能<sup>[22]</sup>。在裸地撂荒过程中，表层植物根系呈先增加后稳定的趋势。与撂荒前期（阶段 I）相比，阶段 II 和阶段 III 的根系密度分别增加了 2.6 和 1.5 倍。中层和下层植物根系随着撂荒阶段的增加均呈显著

增加趋势（图 2b）。可见，裸地撂荒过程中植物根系能够固结中层和下层土壤，使得土壤抗冲性增强，而上层土壤随着撂荒年限的增大积累的松散物质增加，此时上层的土壤侵蚀几率变小的可能原因主要来自地上植被及其枯落物对降雨的减弱作用<sup>[27-28]</sup>。

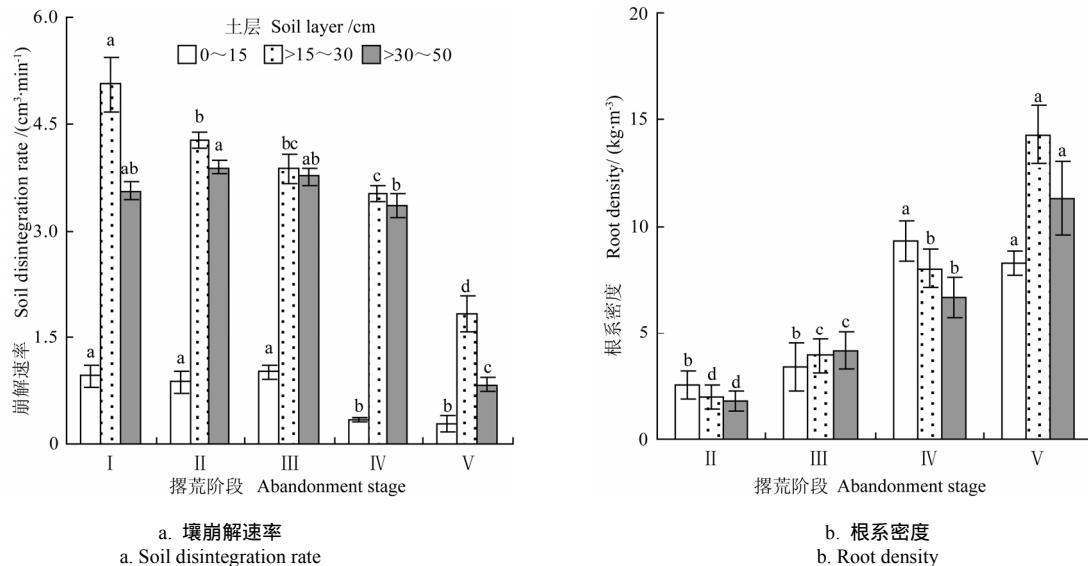


图 2 不同撂荒阶段土壤崩解速率和根系密度变化

Fig.2 Soil disintegration rate and root density during different abandonment stages

## 2.2 不同撂荒阶段土壤抗冲性的变化特征

土壤抗冲性是指土壤抵抗外营力机械破坏作用的能力，是土壤抗侵蚀性能的重要方面。由图 3 可以看出，随着撂荒年限的增大，表层土壤抗冲性呈现出先增加后稳定的趋势，以阶段 II 为转折点。这可能与第 II 阶段样地为阳坡样地，其土壤性质及根系密度较低于同期阴坡样地有关<sup>[17]</sup>。土壤抗冲性在中层土壤上呈稳定增加趋势，而在下层土壤上无显著变化，在第 II 阶段分别达到了 0.49 和 0.28 L/g，与对照相比，分别增加 76.9%和 30.7%。这可能是由于表层土壤在撂荒过程中植物根系通过网络串联作用固结土壤，促进了土壤团粒结构的形成，强

化了土壤抗侵蚀能力。同时，植物根系在撂荒过程中通过生物化学作用能够增加土壤微生物活性和提高土壤有机质含量（表 3），进一步提高了土壤抗冲能力。随着撂荒年限增大，根系作用于土壤的能力逐步趋于稳定。而中、下层土壤随着撂荒年限的增大，群落结构变得复杂（如长芒草到铁杆蒿-长芒草群落，见表 1），根系密度呈显著增加，根系作用于土壤越来越明显，尤其在中层土壤作用越来越强，土壤有机质含量显著增加。因此，土壤抗冲能力增加较下层快。可见，随着撂荒年限的增加，土壤抗冲性均有不同程度的提高，而这种变化主要是因为植物根系通过影响土壤理化性质产生的<sup>[4,9]</sup>。

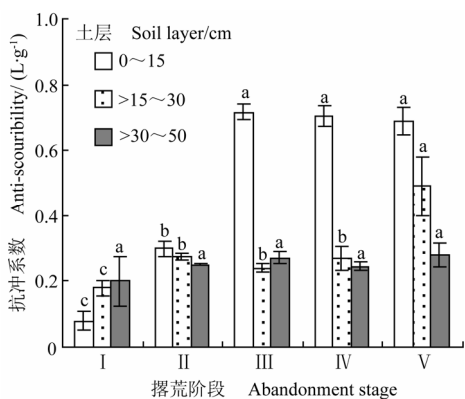


图 3 不同撂荒阶段土壤抗冲性变化

Fig.3 Soil anti-scourability during different abandonment stages

### 2.4 撂荒地土壤抗冲性方程

土壤抗冲性是由植物根系、土壤水稳性团聚体等多因素决定的一个综合性指标<sup>[12]</sup>。不同土层随着

撂荒年限的变化，其指标有所变化。运用 SPSS 软件对土壤容重  $X_1$ 、土壤团聚体  $X_2$ 、抗剪强度（黏聚力  $X_3$  和内摩擦角  $X_4$ ）土壤崩解速率  $X_5$  和根系密度  $X_6$  与土壤抗冲性  $\hat{Y}$  进行逐步回归分析得到撂荒地土壤抗冲性方程（表 4）。

由表 4 可以看出，撂荒地不同土层土壤抗冲性与土壤物理性质及根系密度的关系密切，但不同土层影响土壤抗冲性的指标有所差异。其中，土壤团聚体和根系密度在 3 个土层中均是影响土壤抗冲性的关键因子。除此之外，影响该区撂荒地表层土壤抗冲性的因素还包括土壤容重、土壤黏聚力  $C$ 。影响中层土壤抗冲性的因素还包括土壤崩解速率，影响下层土壤抗冲性的因素还包括土壤黏聚力  $C$ 。类似的研究在法国南部石灰土及中国元谋干热河谷上均有报道<sup>[24,29-30]</sup>。

表 3 不同撂荒阶段土壤有机质的变化

Table 3 Soil organic matter content during different abandonment stages

土层 Soil layer/cm	有机质质量分数 Soil organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )				
表层 Surface layer (0~15)	3.77±0.34 e	5.31±0.24 d	6.69±0.40 c	8.03±0.58 b	11.38±1.57 a
中层 Middle layer (>15~30)	3.19±0.41 c	3.51±0.10 c	5.06±0.32 b	7.51±0.34 a	7.49±0.33 a
下层 Lower layer (>30~50)	2.29±0.13 c	2.22±0.06 c	2.90±0.12 b	4.95±0.14 a	4.27±0.68 a

注：不同字母表示同一土层不同阶段差异显著。

Note: Different letters indicate significant difference among stages in the same soil layer.

表 4 撂荒地不同土层土壤抗冲性与土壤物理性质及根系密度的关系

Table 4 Relationship between soil physical properties, root density and soil scourability at three soil layers during different abandonment stages

土层 Soil layer/cm	回归方程 Regression equation
0~15	$\hat{Y}=0.606-0.035X_1+2.936X_2+0.116X_3+0.116X_6$ ( $R^2=0.912$ , $n=20$ , $P<0.05$ )
>15~30	$\hat{Y}=0.639+0.219X_2-0.094X_3+0.308X_6$ ( $R^2=0.868$ , $n=20$ , $P<0.05$ )
>30~50	$\hat{Y}=0.151+0.257X_2+0.019X_3+0.259X_6$ ( $R^2=0.720$ , $n=20$ , $P<0.05$ )

注： $\hat{Y}$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$ 和 $X_6$ 分别代表土壤抗冲性(L/g)、容重(g/cm<sup>3</sup>)、土壤团聚体(%)、黏聚力(kPa)、崩解速率(cm<sup>3</sup>/min)和根系密度(kg/m<sup>3</sup>)。 $R^2$ 、 $n$ 和 $P$ 分别代表决定系数、样本量和差异显著性。

Note:  $\hat{Y}$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_5$  and  $X_6$  denote soil anti-scourability (L/g), bulk density (g/cm<sup>3</sup>), aggregation (%), cohesion (kPa), disintegration rate (cm<sup>3</sup>/min) and root density (kg/m<sup>3</sup>).  $R^2$ ,  $n$  and  $P$  are coefficient of determination, sample number and significance.

### 3 结 论

1) 撂荒地土壤物理性质随着撂荒年限增加均有所改善。与对照(阶段 I)相比，表层(0~15 cm)和中层(>15~30 cm)土壤容重显著降低，而下层(>30~50 cm)土壤容重变化较小。土壤团聚体和抗剪强度(黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\phi$ )在 3 个土层中均呈增加趋势而土壤崩解速率在 3 个土层中呈下降趋势。

2) 随着撂荒年限的增加，土壤抗冲性在表层土壤上先增加后趋于稳定，在中层土壤上呈稳定增加趋势，而在下层土壤上无显著变化。在第 V 阶段中层和下层土壤抗冲系数分别达到了 0.49 和 0.28 L/g，与对照相比，分别增大 76.9%和 30.7%。

3) 撂荒地不同土层土壤抗冲性与土壤物理性质及根系密度的关系密切。土壤团聚体和根系密度在 3 个土层中均是影响土壤抗冲性的关键指标。除此，影响土壤抗冲性的因素还包括容重、黏聚力  $C$  和崩解速率。

#### [参 考 文 献]

[1] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3271 - 3275. Zhou Zhengchao, Shanguan Zhouping. Soil anti-scourability during vegetation succession of Ziwuling secondary forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3271 - 3275. (in Chinese with English abstract)

[2] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284 - 293.

- [3] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14 - 20.  
Zhao Yonggang, Zhao Shiwei, Cao Lihua, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semiarid typical grassland areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 14 - 20. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441 - 448.  
Zhao Yunge, Xu Mingxiang, Wang Quanjiu, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China[J]. Journal of Natural Resource, 2006, 21(3): 441 - 448. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 849 - 853.  
Li Peng, Li Zhanbin, Zhan Taizhan. Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 849 - 853. (in Chinese with English abstract)
- [6] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2007, 32(9): 1323 - 1345.
- [7] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Process in Physical Geography, 2005, 29(2): 189 - 217.
- [8] 朱显谟. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110 - 120.  
Zhu Xianmo. Effect of vegetation factor on soil and water loss in the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 1960, 8(2): 110 - 120. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11 - 18.  
Li Yong, Xu Xiaoqin, Zhu Xianmo, et al. Plant roots and soil anti-scourability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 11 - 18. (in Chinese with English abstract)
- [10] Zhou Z C, Shangguan, Z P. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau[J]. Catena, 2010, 82(2): 87 - 91.
- [11] Abdi E, Majnounian B, Genet M, et al. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1409 - 1416.
- [12] 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 64 - 68.  
Yang Yumei, Zheng Zicheng, Li Tingxuan. Soil anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 64 - 68. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丁军, 王兆骞, 陈欣, 等. 红壤丘陵区林地根系对土壤抗冲增强效应的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 9 - 12.  
Ding Jun, Wang Zhaoqian, Chen Xin, et al. Study on increased effect of soil anti-scourability by root system of forest land in red soil hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 9 - 12. (in Chinese with English abstract)
- [14] 闫业超, 张树文, 岳书平. 近 40 a 黑土典型区坡沟侵蚀动态变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 109 - 115.  
Yan Yechao, Zhang Shuwen, Yue Shuping. Dynamic change of hill slope and gully erosion in typical area of black soil region during the past 40 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 109 - 115. (in Chinese with English abstract)
- [15] Genet M, Kokutse N, Stokes A, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(8): 1517 - 1526.
- [16] 薛箴, 刘国彬, 戴全厚, 等. 黄土丘陵区人工灌木林恢复过程中的土壤微生物生物量演变[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 517 - 523.  
Xue Sha, Liu Guobin, Dai Quanhou, et al. Dynamic changes of soil microbial biomass in the restoration process of shrub plantations in loess hilly area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(3): 517 - 523. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zhang Chao, Xue Sha, Liu Guobin, et al. Effects of slope aspect on soil chemical and microbial properties during natural recovery on abandoned cropland in the Loess Plateau[J]. Advanced Materials Research, 2012, 356 - 360: 2422 - 2429.
- [18] Zhang Chao, Liu Guobin, Xue Sha, et al. Rhizosphere soil microbial properties on abandoned croplands in the Loess Plateau, China during vegetation succession[J]. European Journal of Soil Biology, 2012, 50(5/6): 127 - 136.
- [19] Yoder, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of soil erosion losses[J]. Society Agronomy. American, 1936, 28(5): 337 - 351.
- [20] Schuppener. 1999. Laboratory method for direct shear tests. Recommendation of the ISSMGE for geotechnical testing. Beuth Verlag GmbH. Germany.
- [21] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(3): 20 - 27.  
Jiang Dingsheng, Li Xinhua, Fan Xingke, et al. Research on the law of soil disintegration rate change and its effect factors on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(3): 20 - 27. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报, 1998, 12(1): 93 - 96.  
Liu Guobin. Study on soil anti-scourability and its mechanism[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93 - 96. (in Chinese with English abstract)
- [23] Su Y Z, Zhao H L. Soil properties and plant species in an age sequence of *Caragana microphylla* plantations in the Horq in Sandy Land, north China[J]. Ecological Engineering, 2003, 20(3): 223 - 235.

- [24] 谌芸, 祝亚军, 何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 42 - 45. Chen Yun, Zhu Yajun, He Binghui. Effect of root system of Bermuda Grass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) on slope reinforcement and soil erosion resistance in Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 42 - 45. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 108 - 113. Chen Anqiang, Zhang Dan, Xiong Donghong, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 108 - 113. (in Chinese with English abstract)
- [26] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报, 2001, 7(7): 79 - 83. Dang Jinqian, Li Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 7(7): 79 - 83. (in Chinese with English abstract)
- [27] De Baets S, Poesen J, Meersmans J, et al. Cover crops and their erosion-resisting effects during concentrated flow erosion[J]. Catena, 2011, 85(3): 237 - 244.
- [28] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中植被根系的动态变化及其垂直分布[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 67 - 72, 85. Wang Junming, Zhang Xingchang. Vertical distribution of root in different successional stages of grassland on abandoned cropland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(4): 67 - 72, 85. (in Chinese with English abstract)
- [29] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. Catena, 2011, 84(1/2): 70 - 78.
- [30] Fan C C, Chen Y W. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(6): 813 - 826.

## Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau

Li Qiang<sup>1</sup>, Liu Guobin<sup>1,2</sup>, Xu Mingxiang<sup>1</sup>, Zhang Zheng<sup>1</sup>, Sun Hui<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Ansai Field Experiment Station of the Chinese Academy of Sciences, Ansai 717400, China)

**Abstract:** The abandoned land plays an important role in degraded ecosystem restoration. Large areas of abandoned land and the relatively little disturbance by human activity made it the optimal mode in the process of the project to “convert the farmland into forestland.” Our objective was to determine the impact of abandoned land and their different stages on soil anti-scourability (AS) and related soil physical properties. In this paper, five natural lands with various abandoned stages (0-43 a) were selected to study the soil AS by using a spatio-temporal substitution method in the Hilly Loess Plateau. Rectangular, undisturbed soil samples (length=20 cm, width=10 cm, and height=10 cm) were taken in the field and were conducted with a hydrological flume (length=2 m, width=0.10 m). The flume contained an opening at its lower base, equaling the size of a metal sampling box, so that the soil surface of the sample was at the same level of the flume surface. The space between the sample box and the flume edges was sealed with a painter’s mastic to prevent edge effects. The slope of the flume bottom could be varied and clear tap water flow was applied at an adjusted rate of 4.03 L/min discharge on a washing flume slope of 15° for 15 minutes. During the 15 minutes of each experiment, samples of runoff and detached soil was collected every one minute in the first three minutes and two minutes in the following time using 10 L buckets for determination of sediment concentration. Before being tested, the aboveground biomass was cut level with the soil surface. In this way, only the effects of roots were accounted for. The physical properties mainly included soil bulk density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), soil water-stable aggregate content (%), soil shear strength (cohesion  $C$  and angle of internal friction  $\phi$ ), and soil disintegration rate ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ). Root biomass was determined by the harvest method and dried in the oven. The results indicated that as the years of the abandoned land increased, compared with control (stage 0), soil bulk density in the surface layer (0-15 cm) and middle layer (>15-30 cm) were significantly reduced, while little change occurred in the lower soil layer (>30-50 cm). The soil water-stable aggregate content and shear strength, including  $C$  and  $\phi$  were also significantly increased in the three studied soil layers. Soil disintegration rate was reduced in all soil layers, especially for the middle and lower soil layers, about 4.2 and 1.8 times the rate of those in the surface soil layer. Soil AS in the surface layer increased rapidly before stage 0, and kept stable in the following abandoned stages, while the soil AS in the middle and lower soil layers increased steadily, in approximately 76.9% and 30.7% increments as compared with those of the control. Linear regression equations between the soil AS and the soil physical properties studied in the present paper were well fitted in the three soil layers and the soil water-stable aggregate content and dry root biomass were the determining factors in the reinforcement of soil AS in the abandoned land of the Hilly Loess Plateau.

**Key words:** soils, physical properties, erosion, abandoned land, root, soil anti-scourability, hilly Loess Plateau