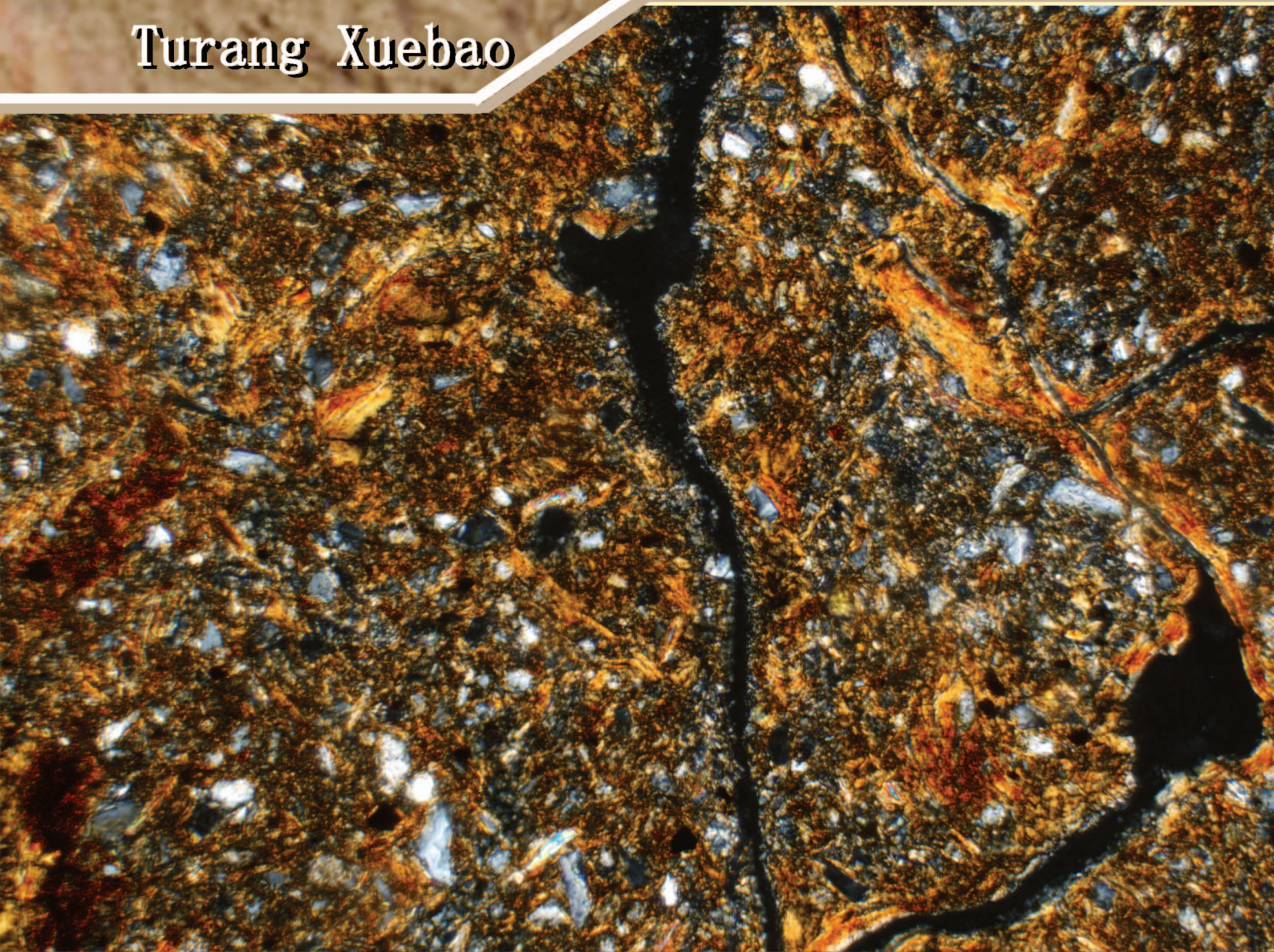


ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第 52 卷 第 2 期

Vol.52 No.2

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第52卷 第2期 2015年3月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 2 Mar., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路71号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史学正
主 管 中国科学院
主 办 中国土壤学会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京399信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

DOI: 10.11766/trxb201403250127

黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响*

吴秋菊¹ 吴佳² 王林华¹ 吴发启^{1†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西安理工大学水利水电学院, 西安 710004)

摘 要 黄土高原地区, 坡面土壤水分是生态建设的关键问题。以黄土高原坡耕地人为管理方式为背景, 在室内人工模拟降雨条件下采用等高耕作和人工掏挖两种措施, 并且设计直线坡作为对照, 研究不同耕作措施下土壤结皮的形成特征, 同时从降雨-入渗的角度研究两种类型结皮(结构结皮和沉积结皮)对坡面土壤水分入渗的影响。研究表明: 土壤结皮阻碍坡面土壤水分入渗, 结皮坡面产流时间早, 且土壤累积入渗量明显低于无结皮坡面; 采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、蒋定生模型对坡面土壤水分入渗过程进行优化模拟的结果表明蒋定生模型适用于描述本研究坡面土壤水分入渗的特征; 耕作措施造成的微地形对土壤结皮的类型有很大影响, 在洼地径流携带泥沙堆积形成沉积结皮, 地势较高处降雨雨滴直接打击形成结构结皮。研究两种类型结皮发现, 沉积结皮相对于结构结皮密度高且孔隙度低, 并且两种类型结皮对坡面土壤水分入渗的影响存在差异, 沉积结皮平均减渗效应为 37.13%, 结构结皮平均减渗效应为 19.79%, 因此, 沉积结皮更大程度影响坡面土壤水分入渗。

关键词 耕作措施; 结构结皮; 沉积结皮; 入渗

中图分类号 S157 **文献标识码** A

土壤结皮是干旱半干旱地区降雨打击、径流压实或灌溉条件下形成的一种常见的地表特征, 其孔隙率小于原状土, 但抗剪切强度高。Chen 等^[1]研究提出土壤结皮的两种形态结构: 结构结皮和沉积结皮。结构结皮形成机理是雨滴打击作用分散土壤团聚体, 细颗粒重新排列组合形成的一层低透水层^[2-4]。沉积结皮是由携带泥沙颗粒的径流在微地形或者植物拦截作用下流速减慢, 输沙能力减小, 导致一些细颗粒堆积在地势比较低的土壤表面而形成的^[4-6]。Bodnar 和 Hulshof^[7]研究表明田间不同类型结皮形成位置有所差异, 即地势较高的地方(垄)结皮类型为结构结皮, 垄间洼地覆盖的结皮类型为沉积结皮。

土壤结皮增加地表径流, 减小土壤入渗率^[8,9], 造成土壤较为严重的生态问题。土壤渗透系数越低, 其入渗率就越低^[10-12]。Shainberg 和 Singer^[13]通过渗透试验研究结构结皮和沉积结皮的导水性, 发现沉积结皮的渗透系数低于结构结皮。Fox 等^[14]研究认

为沉积结皮的厚度范围为 0.7 ~ 1.0 cm, 并且发现其渗透系数低于结构结皮。Ndiaye 等^[15]通过圆盘入渗仪同样测得沉积结皮的水力传导率低于结构结皮。然而两种类型结皮在降雨条件下对坡面土壤水分入渗量大小的影响鲜有深入探讨。

入渗是水分进入土壤增加土壤含水量的过程, 不仅直接决定着地表径流侵蚀量, 同时也决定土壤水分和地下水的补给情况^[16]。在我国黄土高原地区, 土壤水分是生态建设的关键问题, 水分特征影响植被分布, 同时也影响着作物产量^[17]。黄土高原典型的耕作方式(例如等高耕作, 人工掏挖等)^[18], 在一定程度上可以减少径流, 增加坡面土壤水分入渗, 减少水土流失的发展。然而黄土疏松, 在降雨打击下容易形成土壤结皮, 影响坡面土壤水分入渗, 限制水分有效性的发挥。本文以黄土高原两种典型的耕作措施为例, 研究微地形影响下土壤结皮的形成特征, 同时从降雨-入渗的角度研究两种类型结皮对坡面土壤水分入渗的影响。

* 国家自然科学基金项目(41271288)资助

† 通讯作者, E-mail: wufaqi@263.net

作者简介: 吴秋菊(1986—), 女, 江西万载人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: orange0916@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2014-03-25; 收到修改稿日期: 2014-09-25

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中部的陕西省延安市(36°40'39"N, 109°31'37"E),属温带大陆性季风气候,年平均气温 8.5 ~ 9.5 °C,年平均降雨量 450 ~

650 mm。该地区降雨分布不均匀,主要集中在夏季,历时短且强度高。

1.2 供试土壤

供试土壤为黄绵土表层耕作土,采样深度为 0 ~ 10 cm。有机质含量为 11.84 g kg⁻¹,土壤颗粒组成见表 1,按照国际制分类为粉质壤土(silty loam)。土壤自然风干,过 4 mm 筛备用。

表 1 试验土壤的颗粒组成

Table 1 Particle size composition of the soil used in the experiment(%)

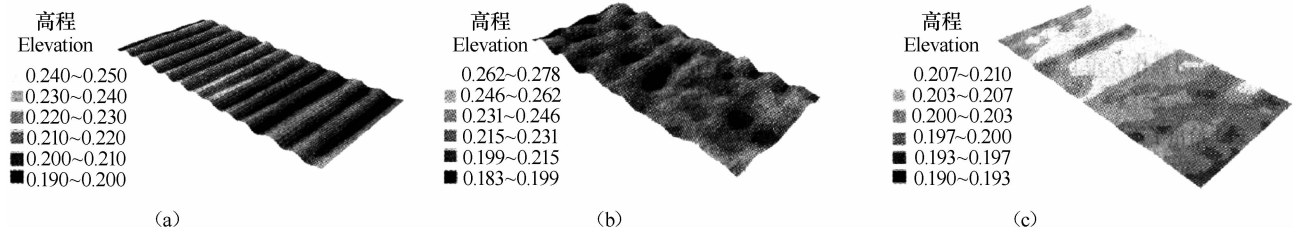
土壤类型 Soil type	1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.002 mm	0.002 ~ 0.001 mm	< 0.001 mm
黄绵土	0.85	19.63	51.19	9.37	5.68	13.28

1.3 试验设计

本试验在西北农林科技大学资源环境学院水土保持与荒漠化防治工程实验室进行,试验采用室内人工模拟降雨法。试验土槽为 2 m × 1 m × 0.5 m 的可调式钢槽,根据采样区域的地形、气候特征,试验坡度设计为 5°、10°、15°、20°,降雨强度设计为 80 mm h⁻¹。各组试验重复 2 次。

试验采用两种耕作措施:等高耕作(Contour

Tillage, CT)和人工掏挖(Artificial Digging, AD),并以直线均整坡(Straight Slope, CK)作为对照。等高耕作:在坡面上垂直于坡面走向进行横向耕作,形成沟和垄,垄高为 7 ~ 10 cm,垄间距为 30 cm(图 1a);人工掏挖:采用锄头掏挖地表,深度为 5 ~ 8 cm,掏挖坑间距为 20 ~ 25 cm(图 1b);直线坡面(CK):将坡面耙磨整平(图 1c)。图 1 为三种处理的 DEM 图。



注:(a)等高耕作;(b)人工掏挖;(c)直线坡 Note: (a) Contour Tillage, (b) Artificial Digging, (c) Straight Slope

图 1 三种处理的 DEM 图

Fig. 1 DEM maps of three tillage treatments

本试验采用的降雨设备为侧喷式降雨系统,由中国科学院水土保持研究所研制,包括支架、供水管道、喷片、潜水泵、控制阀等部分组成。降雨时供水压强由阀门控制,降雨强度主要通过喷片孔板的孔径来调节。降雨喷头距地面为 6 m,喷水高度为 1.5 m。雨滴中数直径为 2.33 mm,降雨动能为 28.48 J m⁻² mm⁻¹。降雨均匀度在 85% 以上,有效降雨面积为 5 m × 7 m。

侵蚀槽装填深度为 40 cm,装填侵蚀槽时根据土壤实际情况设定容重为 1.20 g cm⁻³。在装填耕作层的过程中,为了保证土壤容重的均一性,将耕作层划分为 8 层,每层厚度为 5 cm,按照容重称取相应重量土壤装填。装填完成后,整平土壤,进行耕作措施的布设。

本研究设计两场降雨试验。第一场降雨试验用于形成前期土壤结皮。将 3 个侵蚀槽调至水平(0°),进行人工模拟降雨,降雨强度为 80 mm h⁻¹,降雨历时为 30 min。其中一个槽子用纱布覆盖形成无结皮坡面,作为结皮坡面的对照;此外两个无覆盖的侵蚀槽直接受降雨打击,形成结皮坡面。结皮侵蚀槽一个用于测定土壤结皮物理指标,另外一个用于进行第二场人工模拟降雨试验。

1.4 计算方法

第一场降雨结束后,将结皮侵蚀槽和无结皮侵蚀槽静置 12 h 后调至指定坡度,同时进行雨强 80 mm h⁻¹,历时 30 min 的人工模拟降雨试验。详细观测降雨的全部过程,记录产流开始时间 t_p,每隔 3 min 取一次径流泥沙样,直至降雨结束。径流量和

泥沙量的测算按照《水土保持试验规范》执行。坡面土壤水分入渗量的测定采用水量平衡法,即降雨量与径流量的差值。

待结皮侵蚀槽表面干燥后,采用钢尺测算不同类型土壤结皮面积。根据沉积结皮形成于洼地这一特点,洼地的面积即为沉积结皮面积。等高耕作条件下,测量洼地沉积结皮的长和宽,即得沉积结皮面积;人工掏挖条件下,以洼地中心为圆心,测量洼地沉积结皮的半径,即得沉积结皮面积;直线坡则被认为只有结构结皮存在,无沉积结皮。而结构结皮面积为坡面总面积与沉积结皮面积的差值。之后采集土块样品(体积约 500 cm^3 ,即 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$)测定土壤结皮物理指标,包括结皮容重、抗剪强度以及孔隙度。土壤结皮容重采用涂膜法,抗剪强度采用椎体贯入法测定;孔隙度通过容重计算得到。

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, ϕ 为土壤结皮孔隙度,% ; ρ_b 为结皮土壤容重, g cm^{-3} ; ρ_s 为土壤比重, $\rho_s = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$ 。

沉积结皮对坡面土壤水分入渗率的影响:

$$A_{\text{total}} \times \Delta\text{IR} = A_{\text{SC}} \times \Delta\text{IR}_{\text{SC}} + A_{\text{DC}} \times \Delta\text{IR}_{\text{DC}} \quad (2)$$

式中, A_{total} 表示整个侵蚀坡面的面积, m^2 ; ΔIR 表示水分入渗率的变化量,% ; A_{SC} 表示结构结皮的面积, m^2 ; $\Delta\text{IR}_{\text{SC}}$ 表示结构结皮对水分入渗率的影响,% ;

A_{DC} 表示沉积结皮的面积, m^2 ; $\Delta\text{IR}_{\text{DC}}$ 表示沉积结皮对水分入渗率的影响,%。

2 结果与讨论

2.1 坡面土壤结皮的分布及特征

Fox 等^[19]研究表明,当土壤在降雨条件下形成结皮后,土壤结皮的空间分布与田间微地形相关,在地表洼地的结皮类型为沉积结皮。耕作措施导致耕层土壤再分布的同时,使地表也出现高低起伏的微小变化。高的部位仅接受雨滴打击;低的部位在汇流前接受雨滴打击,当汇流积水后,雨滴打击作用减弱,而积水的压实作用加强。因此,较高部位的结皮类型为结构结皮,低洼处的结皮类型为沉积结皮,两种类型结皮形成示意图见图 2。等高耕作时,结构结皮主要出现在垄上,沉积结皮则出现在“沟”中。人工掏挖点种时,结构结皮主要形成在洼地的周围,而洼地中则为沉积结皮。对照坡面(直线坡)主要为结构结皮。两种耕作措施条件下,由于地表起伏程度不同,两类结皮所占的面积也各不相同(见表 2)。表 3 为试验测定土壤结构结皮和沉积结皮性质,由于成因不同,导致两种结皮密度、孔隙度和抗剪强度明显不同,由表 3 可知,沉积结皮相对于结构结皮密度高且孔隙度低,这可能是导致坡面土壤水分入渗量差异的根本原因。

表 2 不同耕作措施下结构结皮和沉积结皮的面积比较

Table 2 Areas of structural crusts and depositional crusts formed as affected by tillage treatments

	结构结皮 Structural crusts (m^2)	沉积结皮 Depositional crusts (m^2)	结构结皮比 Structural crusts percentage (%)	沉积结皮比 Depositional crusts percentage (%)
等高耕作 Contour tillage	1.01	0.99	50.50	49.50
人工掏挖 Artificial digging	1.51	0.49	75.50	24.50
直线坡 Straight slope	2.00	0	100	0

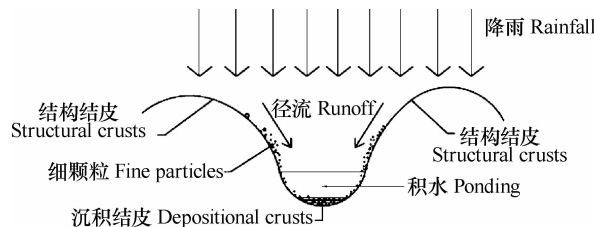


图 2 结构结皮和沉积结皮形成示意图

Fig. 2 Schematic description of structural and depositional crusts formation

表 3 结构结皮和沉积结皮的性质

Table 3 Properties of structural and depositional crusts

类型 Soil crusts types	密度 Bulk density (g cm^{-3})	孔隙度 Porosity (%)	抗剪强度 Shear strength (kPa)
结构结皮 Structural crusts	1.42 ± 0.09	0.46 ± 0.04	31.50 ± 8.09
沉积结皮 Depositional crusts	1.46 ± 0.11	0.44 ± 0.04	30.20 ± 7.17

2.2 土壤结皮对坡面水分入渗的影响

坡面土壤受雨滴打击大团聚体被分散,使土壤表面容重增大,密度增加;而一些细小颗粒随着水分垂直入渗阻塞表层土壤孔隙,进而阻碍坡面土壤水分入渗^[8,9]。黄土高原坡面土壤水分入渗类型为超渗产流,即当降雨强度小于入渗率时,入渗率随降雨强度的增大而增大;当降雨强度远大于土壤入渗率时,雨水降落到坡面上来不及入渗,就转化成坡面径流。径流形成的越早,说明入渗到土壤中的水分越少。表 4 为结皮坡面和无结皮坡面的产流时间。结皮坡面的产流时间明显早于无结皮坡面,两者差异性显著。随着坡度增加,坡面产流时间逐渐提早,结皮坡面与无结皮坡面的产流时间的差距也逐渐减小。在直线坡 20° 坡的条件下,结皮坡面与无结皮坡面的产流时间无显著性差异。土壤结皮

的影响随着坡度的增加而降低,这与程琴娟等^[12]及吴发启和范文波^[20]研究结果相似。

图 3 为不同耕作条件下结皮坡面与无结皮坡面的入渗特征曲线。没有径流条件下,坡面土壤水分入渗率等于降雨量,而随着时间的推移,入渗速率急剧下降,然后趋于稳定。在整个过程中,无结皮坡面的水分入渗率始终高于结皮坡面,并且达到稳定入渗的时间迟于结皮坡面。无结皮坡面的稳定入渗率为结皮坡面 0.78 倍~1.68 倍。当坡度增加至 20° 时,三种耕作条件下,结皮坡面与无结皮坡面的稳定入渗率非常接近。在累积入渗量方面(图 4),无结皮坡面的累积入渗量始终高于结皮坡面,且差异显著。随着坡度的增加,结皮坡面和无结皮坡面的累积入渗量均减小,且两种坡面的差异性也逐渐减小。

表 4 不同耕作措施下土壤结皮对坡面产流时间的影响

Table 4 Effect of soil crusts on runoff initiation time relative to tillage treatments (min)

	等高耕作 Contour tillage		人工掏挖 Artificial digging		直线坡 Straight slope	
	结皮坡面 Crusted	无结皮坡面 Uncrusted	结皮坡面 Crusted	无结皮坡面 Uncrusted	结皮坡面 Crusted	无结皮坡面 Uncrusted
5°	3.33 b	4.60 a	3.20 b	3.68 a	1.45 b	1.75 a
10°	3.17 b	4.28 a	1.93 b	3.62 a	1.32 b	1.53 a
15°	1.63 b	3.03 a	1.38 b	3.15 a	1.05 b	1.32 a
20°	1.58 b	2.67 a	1.28 b	2.53 a	1.05 a	1.08 a

注:不同字母表示同种耕作措施条件下结皮坡面与无结皮坡面差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences between slopes crusted and uncrusted under the same tillage treatment ($p < 0.05$)

由图 3 和图 4 结果可知,表土结皮对坡面土壤水分入渗影响显著,结皮减弱坡面土壤水分入渗。这个结果与国内外众多学者研究结果相似。Moore^[21]研究得出表土结皮可以减小高达 80% 左右的入渗量。蔡强国等^[22]研究表明在降雨历时相同的条件下,前期表土结皮坡面的径流量较无结皮坡面增加 6 倍~25 倍。贾志军和王小平^[23]研究认为黄土地区表土结皮的形成对坡耕地土壤含水量造成了一定的影响,结皮的破坏可提高土壤的水分入渗率。杨永辉等^[24]也认为地表封闭或结皮导致降雨时水分进入土壤向下运动的速率

有所降低。

2.3 结皮与无结皮坡面水分入渗过程模拟

本研究采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、蒋定生模型三个代表性模型对坡面土壤水分入渗过程进行优化模拟。由表 5~表 7 可见,坡面土壤水分入渗回归模型在不同耕作措施下和有无结皮条件下拟合优度存在差异。其中拟合优度以蒋定生模型最高(决定系数 R^2 均高于 0.800),在等高耕作和人工掏挖条件下,Kostiakov 模型较差;而在直线坡条件下,Horton 模型最差。结皮坡面与无结皮坡面模拟结果差异不明显。蒋定生^[25]模型是基

于 Kostiakov 和 Horton 入渗公式,并结合黄土高原大量的野外测试资料而提出的描述黄土高原土壤

在积水条件下的入渗公式,因此在本研究中较为适用。

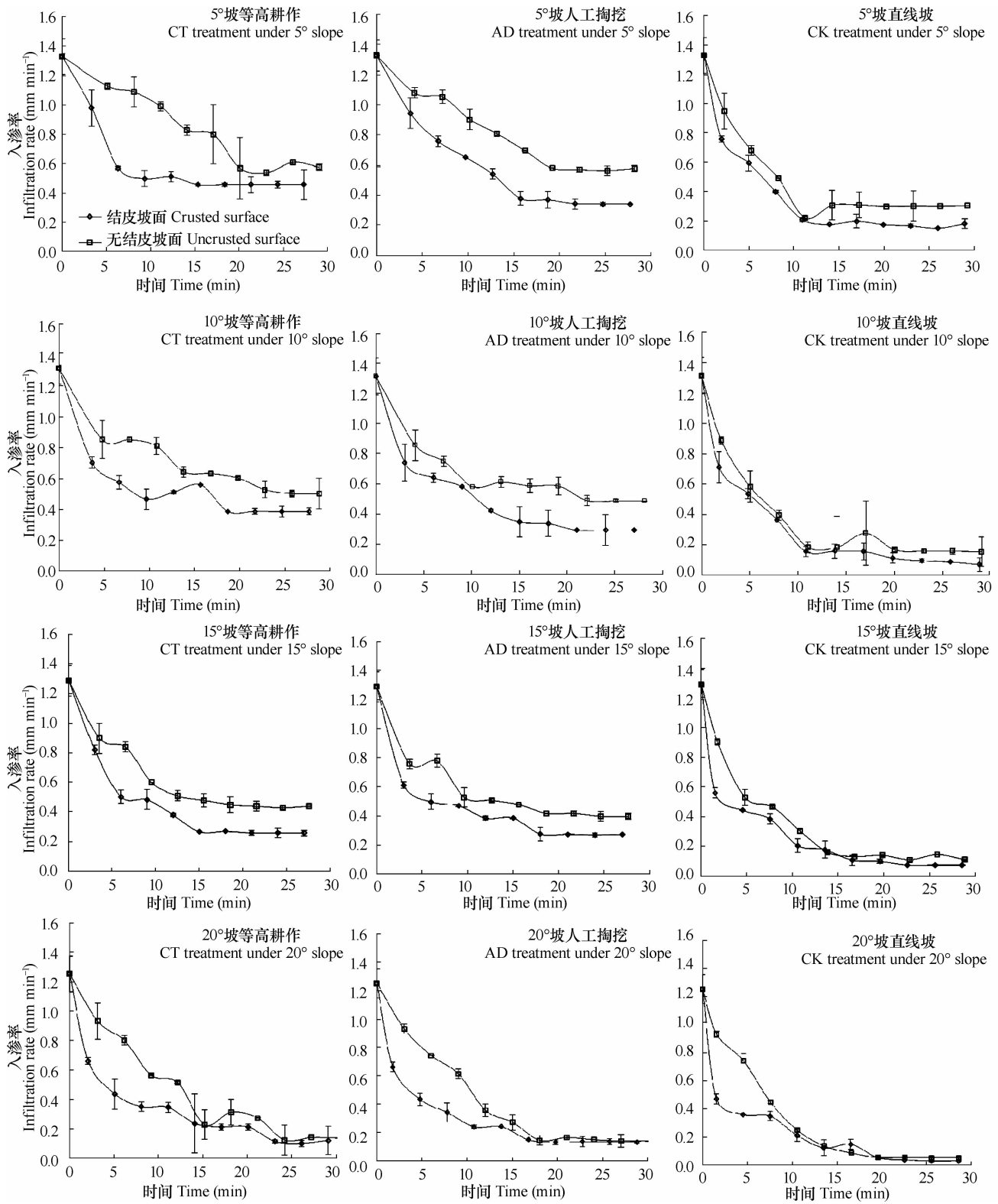
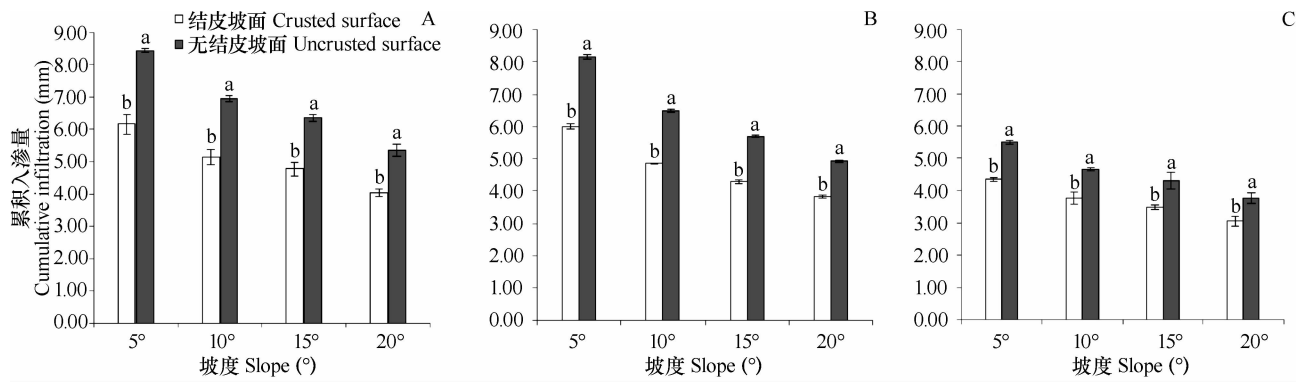


图3 不同耕作措施下结皮坡面与无结皮坡面土壤水分入渗过程曲线

Fig. 3 Curves of water infiltration process in soils crusted and uncrusted as affected by tillage treatments



注:同一坡度不同字母表示结皮坡面和无结皮坡面差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different letters on top of the columns mean significant differences between soils crusted and uncrusted by paired T-test ($p < 0.05$)

图4 不同耕作措施下土壤结皮与无结皮坡面的累积入渗量(A. 等高耕作;B. 人工掏挖;C. 直线坡)

Fig. 4 Cumulative water infiltration in soils crusted and uncrusted relative to tillage treatment (A. Contour tillage, B. Artificial digging, C. Straight slope)

表5 Kostikov 模型回归分析结果

Table 5 Regression analysis with Kostikov model

地表状况 Soil surface	坡度 Slope(°)	等高耕作 CT	决定系数 R^2	人工掏挖 AD	决定系数 R^2	直线坡 CK	决定系数 R^2
结皮坡面 Crusted surface	5	$f = 3.29t^{-0.63}$	0.883	$f = 3.95t^{-0.75}$	0.928	$f = 3.63t^{-0.97}$	0.890
	10	$f = 1.17t^{-0.32}$	0.798	$f = 1.61t^{-0.50}$	0.858	$f = 2.01t^{-0.88}$	0.849
	15	$f = 2.01t^{-0.63}$	0.908	$f = 1.17t^{-0.43}$	0.854	$f = 1.42t^{-0.80}$	0.789
	20	$f = 1.65t^{-0.71}$	0.816	$f = 1.44t^{-0.70}$	0.874	$f = 1.58t^{-0.96}$	0.686
无结皮坡面 Uncrusted surface	5	$f = 3.93t^{-0.57}$	0.880	$f = 3.31t^{-0.53}$	0.928	$f = 2.81t^{-0.72}$	0.814
	10	$f = 1.61t^{-0.32}$	0.799	$f = 1.45t^{-0.32}$	0.884	$f = 2.14t^{-0.78}$	0.844
	15	$f = 1.83t^{-0.44}$	0.882	$f = 1.44t^{-0.38}$	0.840	$f = 2.42t^{-0.87}$	0.850
	20	$f = 4.99t^{-0.97}$	0.812	$f = 6.71t^{-1.16}$	0.865	$f = 5.86t^{-1.55}$	0.756

注: f 为入渗速率, t 为入渗时间 Note: f stands for infiltration rate and t for infiltration time

表6 Horton 模型回归分析结果

Table 6 Regression analysis with Horton model

地表状况 Soil surface	坡度 Slope(°)	等高耕作 CT	决定系数 R^2	人工掏挖 AD	决定系数 R^2	直线坡 CK	决定系数 R^2
结皮坡面 Crusted surface	5	$f = 0.98 + 0.52e^{-0.05t}$	0.810	$f = 0.76 + 0.42e^{-0.06t}$	0.913	$f = 0.60 + 0.43e^{-1.92t}$	0.686
	10	$f = 0.77 + 0.39e^{-0.03t}$	0.823	$f = 0.74 + 0.45e^{-0.04t}$	0.949	$f = 0.71 + 0.63e^{-3.32t}$	0.785
	15	$f = 0.82 + 0.56e^{-0.06t}$	0.902	$f = 0.61 + 0.34e^{-0.04t}$	0.950	$f = 0.56 + 0.48e^{-4.13t}$	0.807
	20	$f = 0.66 + 0.55e^{-0.07t}$	0.900	$f = 0.66 + 0.53e^{-3.31t}$	0.799	$f = 0.47 + 0.43e^{-5.64t}$	0.735
无结皮坡面 Uncrusted surface	5	$f = 1.08 + 0.52e^{-0.04t}$	0.928	$f = 1.05 + 0.48e^{-0.04t}$	0.959	$f = 0.68 + 0.38e^{-1.58t}$	0.659
	10	$f = 0.85 + 0.32e^{-0.02t}$	0.900	$f = 0.86 + 0.37e^{-0.02t}$	0.887	$f = 0.89 + 0.73e^{-2.45t}$	0.715
	15	$f = 0.89 + 0.46e^{-0.04t}$	0.894	$f = 0.76 + 0.35e^{-0.03t}$	0.892	$f = 0.90 + 0.78e^{-2.73t}$	0.762
	20	$f = 0.80 + 0.66e^{-0.08t}$	0.912	$f = 1.06 + 0.94e^{-2.46t}$	0.794	$f = 0.93 + 0.91e^{-3.97t}$	0.699

注: f 为入渗速率, t 为入渗时间 Note: f stands for infiltration rate and t for infiltration time

表 7 蒋定生模型回归分析结果

Table 7 Regression analysis with Jiang Dingsheng model

地表状况 Soil surface	坡度 Slope(°)	等高耕作 CT	决定系数 R^2	人工掏挖 AD	决定系数 R^2	直线坡 CK	决定系数 R^2
结皮坡面 Crusted surface	5	$f = 0.46 + 0.87t^{-0.53}$	0.886	$f = 0.35 + 0.98t^{-0.66}$	0.966	$f = 0.17 + 1.16t^{-0.81}$	0.929
	10	$f = 0.39 + 0.93t^{-0.30}$	0.806	$f = 0.31 + 1.01t^{-0.49}$	0.936	$f = 0.09 + 1.22t^{-0.89}$	0.931
	15	$f = 0.26 + 1.03t^{-0.57}$	0.943	$f = 0.27 + 1.02t^{-0.41}$	0.918	$f = 0.08 + 1.21t^{-0.81}$	0.883
	20	$f = 0.11 + 1.14t^{-0.70}$	0.875	$f = 0.13 + 1.12t^{-0.65}$	0.946	$f = 0.04 + 1.22t^{-1.05}$	0.776
无结皮坡面 Uncrusted surface	5	$f = 0.57 + 0.76t^{-0.54}$	0.921	$f = 0.57 + 0.76t^{-0.48}$	0.970	$f = 0.30 + 1.03t^{-0.57}$	0.775
	10	$f = 0.51 + 0.80t^{-0.35}$	0.897	$f = 0.51 + 0.80t^{-0.29}$	0.915	$f = 0.16 + 1.15t^{-0.71}$	0.889
	15	$f = 0.44 + 0.85t^{-0.41}$	0.929	$f = 0.41 + 0.88t^{-0.37}$	0.912	$f = 0.13 + 1.16t^{-0.83}$	0.919
	20	$f = 0.13 + 1.12t^{-0.99}$	0.877	$f = 0.14 + 1.11t^{-1.06}$	0.920	$f = 0.05 + 1.20t^{-1.19}$	0.885

注: f 为入渗速率, t 为入渗时间 Note: f stands for infiltration rate and t for infiltration time

2.4 不同类型土壤的结皮减渗效应

表 8 表示不同耕作条件下结皮坡面与无结皮坡面累积入渗量的相对变化率。直线坡坡面入渗率下降的最少, 仅为 18.62%~20.95%, 而等高耕作和人工掏挖的坡面入渗率较直线坡的下降的多。Roulie 等^[26]在测定自然降雨条件下粉壤土导水率时发现, 结构结皮的导水率高于沉积结皮。

表 8 不同耕作条件下结皮坡面与无结皮坡面累积入渗量相对变化率

Table 8 Relative changing rate (R_c) of accumulative water infiltration in soils crusted and uncrusted relative to tillage treatment (%)

坡度 Gradient	等高耕作 CT	人工掏挖 AD	直线坡 CK
5°	-27.10	-26.47	-20.95
10°	-26.15	-25.27	-19.14
15°	-25.00	-24.74	-18.65
20°	-24.63	-21.95	-18.62

通过式(2)计算可知, 等高耕作条件下沉积结皮减渗效应为 30.76%~33.38%; 人工掏挖条件下沉积结皮减渗效应为 32.23%~43.49%。总体而言, 沉积结皮的减渗效应为 30.76%~43.49%, 平均减渗效应为 37.13%; 而结构结皮的减渗效应为 18.62%~20.95%, 平均减渗效应为 19.79%。沉积结皮减渗效应为结构结皮减渗效应的 1.9 倍。由此可见, 相同降雨条件下, 沉积结皮的入渗率低于结构结皮的入渗率。Shainberg 和 Singer^[13]、Fox 等^[14]和 Ndiaye 等^[15]等也得出类似结果, 即沉积结皮的导水率低于结构结皮的导水率。

结构结皮和沉积结皮对坡面土壤水分入渗影

响的差异主要是由于两种结皮形成机制不同。结构结皮是在降雨雨滴打击下团聚体颗粒分散重组形成的, 而沉积结皮是由于携沙水流中的细颗粒沉积阻塞土壤孔隙而形成的。对于两种土壤结皮的结构, 胡霞等^[4]通过对土壤结皮切片研究发现沉积结皮的上部主要覆盖大颗粒土壤, 次表层为内部孔隙较低的细颗粒发育的致密层; 结构结皮的表层则是由一组细颗粒排列而成的致密层, 而两种结构的结皮大孔隙均出现在致密层以下。沉积结皮对坡面土壤水分入渗的阻碍不仅受到致密层的影响, 同时也受到表层大颗粒的影响。因此, 沉积结皮能够更大程度地阻碍坡面土壤水分入渗。

土壤容重反映单位体积内土壤颗粒排列松紧程度, 并且影响土壤的持水能力和入渗性能^[27]。随着土壤容重变大, 土壤孔隙度会减小, 水分进入土壤的能力减弱。本研究中, 土壤初始容重控制在 1.20 g cm^{-3} 左右, 随着土壤结皮的形成, 土壤容重明显增大(结构结皮为 $1.42 \pm 0.09 \text{ g cm}^{-3}$, 沉积结皮为 $1.46 \pm 0.11 \text{ g cm}^{-3}$), 因此结皮坡面累积入渗量较无结皮坡面明显降低。结构结皮相对于沉积结皮容重低, 孔隙度大。孔隙度越大, 水分在坡面水平和垂直运动的条件增强, 坡面土壤水分入渗增加。

3 结 论

本文通过人工模拟降雨的方法, 对等高耕作和人工掏挖两种黄土高原典型耕作措施下形成的不同类型的土壤结皮及其入渗特征进行研究。结果表明土壤结皮的存在极大地影响坡面土壤水分入渗, 结皮坡面产流时间早, 土壤稳定入渗率和累积入渗量明显低

于无结皮坡面。回归分析表明,蒋定生模型比较适合描述本研究坡面土壤水分入渗的特征。耕作措施造成的微地形对土壤结皮类型有很大的影响,即在洼地径流携带泥沙堆积而形成沉积结皮,而地势较高处降雨雨滴直接打击形成结构结皮。沉积结皮相对于结构结皮密度高且孔隙度低,并且沉积结皮平均减渗效应较结构结皮强,沉积结皮能够更大程度影响坡面土壤水分入渗。黄土高原地处我国西北地区,干旱缺水是当地的主要环境问题,增大坡面土壤水分入渗量,即可以减小当地的水土流失,同时也可以增加作物对水分的利用,进而增加作物产量。黄土高原地区的坡面结皮限制土壤水分与环境的交换。因此,应尽可能破坏地表结皮,尤其是破坏地表沉积结皮从而增加坡面土壤水分入渗。

参考文献

- [1] Chen J, Tarchitzky J, Brouwer J, et al. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science*, 1980, 130: 49—55
- [2] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 848—851
- [3] Onofriok O, Singer MJ. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 1137—1143
- [4] 胡霞, 蔡强国, 刘连友, 等. 人工降雨条件下几种土壤结皮发育特征. *土壤学报*, 2005, 42(3): 504—507. Hu X, Cai Q G, Liu L Y, et al. Development of soil crust through simulated rainfall in laboratory (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 504—507
- [5] Arshad M A, Mermut A R. Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in northwestern Alberta, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52: 724—729
- [6] Valentin C, Bresson L M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 1992, 55: 225—245
- [7] Bodna' r F, Hulshof J. Soil crusts and deposits as sheet erosion indicators in southern Mali. *Soil Use and Management*, 2006, 22: 102—109
- [8] McIntyre D S. Permeability measurement of soil crusts from raindrop impact. *Soil Science*, 1958, 85: 185—189
- [9] McIntyre D S. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, 1958, 85: 261—266
- [10] Cerdan O, Souchère V, Lecomte V, et al. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena*, 2002, 46: 189—205
- [11] Li X Y, González A, Solé-Benet A. Laboratory methods for the estimation of infiltration rate of soil crusts in the Tabernas Desert badlands. *Catena*, 2005, 60: 255—266
- [12] 程娟娟, 蔡强国, 廖义善. 土壤表面特征与坡度对产流产沙的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 9—12. Cheng Q J, Cai Q G, Liao Y S. Effects of soil surface characteristics and gradient on runoff and sediment yield (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 9—12
- [13] Shainberg I, Singer M J. Effect of electrolytic concentration on the hydraulic properties of depositional crust. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 1260—1263
- [14] Fox D M, Bissonnais Y L, Quetin P. The implications of spatial variability in surface seal hydraulic resistance for infiltration in a mound and depression microtopography. *Catena*, 1998, 32: 101—114
- [15] Ndiaye B, Esteves M, Vandervaere J P, et al. Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties, and runoff generation for a sandy loam soil. *Journal of Hydrology*, 2005, 307: 294—311
- [16] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and initial soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1/2): 24—32
- [17] Chen L, Huang Z, Gong J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2007, 70: 200—208
- [18] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 2013, 6(4): 400—409
- [19] Fox D M, Le Bissonnais Y, Bruand A. The effect of ponding depth on infiltration in a crusted surface depression. *Catena*, 1998, 32: 87—100
- [20] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97—101. Wu F Q, Fan W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 97—101
- [21] Moore I D. Effect of surface sealing on infiltration. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24: 1546—1561
- [22] 蔡强国, 陈浩, 陆兆雄. 表土结皮在溅蚀和侵蚀过程中的作用. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究, 1985: 57—64. Cai Q G, Chen H, Lu Z X. The effects of surface soil crust on the splash erosion and erosion process (In Chinese). *Study of the Source of Yellow Coarse Sediment and Mechanism of Erosion*, 1985: 57—64
- [23] 贾志军, 王小平. 黄土表面结皮对夏闲坡耕地土壤水分的影响研究. *中国水土保持*, 2002(9): 18—19. Jia Z J, Wang X P. Study on influence of soil moisture of summer slack farming sloped lands due to crusted loess surface (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2002(9): 18—19
- [24] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响. *生态学报*, 2006, 26(5): 1624—1630. Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1624—1630
- [25] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究. *土壤学*

- 报, 1986, 23(4): 299—304. Jiang D S, Huang G J. Study of the soil infiltration rate in Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23(4): 299—304
- [26] Roullet S, Angulo-Jaramillo R, Biersson L M, et al. Water transfer and mobile water content measurement in a cultivated crusted soil. *Soil Science*, 2002, 167: 201—210
- [27] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53—56. Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess Region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 53—56

EFFECTS OF SOIL CRUSTS ON INFILTRATION IN SLOPE LAND IN THE LOESS AREA

Wu Qiuju¹ Wu Jia² Wang Linhua¹ Wu Faqi^{1†}

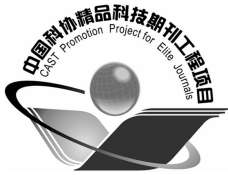
(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 College of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710004, China)

Abstract Infiltration is a process of water penetration through the soil surface. During rainfall events, the amount of infiltration determines the quantity of water available for plant uptake, and abundant water helps increase crop yield. In the arid and semi-arid regions, water availability is one of the greatest factors affecting vegetation restoration and ecological environments, especially in the Chinese Loess Plateau area. Proper tillage practices can significantly alleviate certain soil-related constraints to crop production, such as compaction, crusting, low infiltration, poor drainage, and unfavourable soil moisture and temperature regimes. Traditional tillage practices used in the Loess Plateau, include contour tillage and artificial digging, can increase soil roughness and decrease runoff and soil erosion. However, the soil in the Loess Plateau has been reported to be poor in structure, susceptible to erosion and liable to form soil crusts during rainfall events. Soil crusts can reduce the amount of infiltration and hence soil moisture availability. The objective of this laboratory study is to explore characteristics of the formation of different types of soil crusts on slopelands different in soil micro-topography and effects of structural crusts and depositional crusts on soil water infiltration from the rainfall-infiltration perspective. For that end, an indoor experiment was designed to have simulated slopelands adjustable to 5°, 10°, 15° and 20° in slope gradient, three different tillage treatments (contour tillage, artificial digging and straight slope as control) and artificial rainfall events. Two rainfall events were simulated in the experiment. After the first rainfall event, structural crusts and the depositional crusts were formed on the slopeland 0° in gradient after 30 min of 80 mm h⁻¹ rainfall, and then the slope lands were adjusted to 5°, 10°, 15° and 20° in gradient, step by step and each subjected to 30 min of 80 mm h⁻¹ rainfall, to investigate rain water infiltration rates in the slopelands as affected by tillage pattern and slope gradient. Results show that soil crusts retarded water infiltration into the soil; consequently, runoff formed earlier on slopes with crusts than on slopes without crusts, and cumulative rain water infiltration was much lower on the former than on the latter. Infiltration rate decreased with increasing slope gradient regardless of the effect of soil crusts. Regression analysis of model simulation indicates that the Jiang Dingsheng model was optimal to describe variation of soil infiltration rate in this study. What type of soil crusts would be formed was significantly affected by tillage treatments. The structural crusts tended to form on ridges, which were directly impacted by rain drops while the depositional crusts formed in furrows between ridges as sediments in runoff deposited. Meanwhile, the structural crusts were lower in bulk density, but higher in porosity and in shear strength than the depositional crusts. The effects of the two types of soil crusts on soil water infiltration rate were different. Depositional crusts reduced accumulative water infiltration by 37.13%, while structural crusts did by 19.79% compared with the accumulative water infiltration on uncrusted slopes. It is quite obvious that the effect of depositional crusts reducing soil water infiltration is much higher than that of structural crusts.

Key words Tillage treatments; Structural crusts; Depositional crusts; Infiltration

(责任编辑:檀满枝)



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 2 期 2015 年 3 月

目 次

综述与评论

- 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法 巨晓棠(249)
- 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展 方华军 程淑兰 于贵瑞等(262)

研究论文

- 商丹盆地黄土母质发育土壤的微形态特征及其诊断意义 庞奖励 黄春长 查小春等(272)
- 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例 宁运旺 张永春(281)
- 三峡库区紫色土的碎石分布特征 王小燕 王天魏 蔡崇法等(293)
- 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响 吴秋菊 吴 佳 王林华等(303)
- 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演 陈颂超 冯来磊 李 硕等(312)
- 五价砷在中国南方两类典型土壤中的迁移特征 李璐璐 张 华 周世伟等(321)
- 柠檬酸盐对黑云母表面溶解及微结构变化的影响 李继福 张文君 鲁剑巍等(329)
- 活化过硫酸钠氧化土壤对挥发性有机污染物吸附特性的影响 丁浩然 王 磊 龙 涛等(336)
- 退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征 黄宗胜 喻理飞 符裕红等(345)
- 缓释复合肥对茄子产量和不同采果期品质的影响 王 菲 李银科 王正银等(355)
- 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响 潘晓健 刘平丽 李 露等(364)
- 应用 ^{15}N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向 张 文 周广威 闵 伟等(372)
- 中国南方基础工程建设中土壤生态修复技术体系与实践 徐国钢 程 睿 赖庆旺等(381)
- 黑土农田施加 AM 菌剂对大豆根际菌群结构的影响 宋福强 程 蛟 常 伟等(390)
- 自生固氮菌对土壤钾的活化作用 张 亮 袁 玲 黄建国(399)
- 长期保护性耕作对纤维素降解基因 *cbh 1* 多样性的影响 陈 坤 李传海 朱安宁等(406)
- 模拟条件下土壤硝化作用及硝化微生物对不同水分梯度的响应 刘若萱 张丽梅 白 刃等(415)
- 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征 喻 为 李忠武 黄金权等(423)

研究简报

- 土壤制图中土壤类型配色模型构建与应用 徐爱国 张维理 张怀志等(431)
- 土壤专题图中采样点点位标识模型的构建 张怀志 张维理 徐爱国等(440)
- 非对称混合电解质体系中恒电荷颗粒表面与 Stern 电位的测定 樊会敏 赵 艳 刘新敏等(446)
- 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化 李俊超 党廷辉 薛 江等(453)
- 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系 谢文军 张衍鹏 张 森等(461)

信息

- 第 20 届国际土壤与耕作研究组织大会 (414)
- 《土壤学报》2014 年度审稿专家名录 (467)

封面图片: 陕西丹凤盆地土壤黏化层典型微形态(由庞奖励提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)—Discussing the methods for N fertilizer recommendation Ju Xiaotang(261)
- Study on the responses of nitrous oxide emission to increased nitrogen deposition in forest soils; A review Fang Huajun, Cheng Shulan, Yu Guirui, et al. (270)

Research Articles

- Micromorphological features of soils derived from loess in Shangdan Basin and their significance in soil diagnosis Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, et al. (279)
- Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization; A case study of rice ... Ning Yunwang, Zhang Yongchun(292)
- Spatial distribution of rock fragments in purple soil in Three Gorges Reservoir Area Wang Xiaoyan, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. (301)
- Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the Loess Area Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. (311)
- Vis-NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression Chen Songchao, Feng Lailei, Li Shuo, et al. (319)
- Migration of pentavalent antimony in two types of soils typical to South China Li Lulu, Zhang Hua, Zhou Shiwei, et al. (327)
- Effects of citrate dissolving surface and altering microstructure of biotite Li Jifu, Zhang Wenjun, Lu Jianwei, et al. (335)
- Effect of soil oxidation with reactivated sodium persulfate on sorption of volatile organic contaminants Ding Haoran, Wang Lei, Long Tao, et al. (343)
- Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon under naturally restoring degenerative karst forest Huang Zongsheng, Yu Lifei, Fu Yuhong, et al. (353)
- Effects of slow-release compound fertilizer on yield and quality of eggplant relative to timing of harvest Wang Fei, Li Yinke, Wang Zhengyin, et al. (362)
- Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system Pan Xiaojian, Liu Pingli, Li Lu, et al. (371)
- Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using ^{15}N tracing method Zhang Wen, Zhou Guangwei, Min Wei, et al. (379)
- Soil ecology remediation technical system and its practice in infrastructure construction in South China Xu Guogang, Cheng Rui, Lai Qingwang, et al. (389)
- Impact of inoculation with AM fungi on microbial community structure in soybean rhizosphere in farmland of black soil Song Fuqiang, Cheng Jiao, Chang Wei, et al. (397)
- Mobilization of potassium in soils by *Azotobacter* Zhang Liang, Yuan Ling, Huang Jianguo(404)
- Effects of long-term conservation tillage on diversity of cellulose degradating gene *cbh I* in Fluvo-aquic soil Chen Kun, Li Chuanhai, Zhu Anning, et al. (413)
- Response of nitrification and nitrifier to change in soil moisture content under simulated conditions Liu Ruoxuan, Zhang Limei, Bai Ren, et al. (421)
- Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion Yu Wei, Li Zhongwu, Huang Jinquan, et al. (430)

Research Notes

- Construction of a color matching model for soil types and its application to soil mapping Xu Aiguo, Zhang Weili, Zhang Huaizhi, et al. (439)
- Development of soil sampling point labeing model for the matic soil maps Zhang Huaizhi, Zhang Weili, Xu Aiguo, et al. (445)
- Principle for determination of surface potential and Stern plane potential of constant charged particles in asymmetric mixed electrolyte solutions Fan Huimin, Zhao Yan, Liu Xinmin, et al. (452)
- Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation Li Junchao, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. (460)
- Relationships between soil physicochemical properties and wheat production in coastal saline soil Xie Wenjun, Zhang Yanpeng, Zhang Miao, et al. (466)

Cover Picture: Typical micromorphological photos in Horizon Bt of the soil profile in Danfeng Basin, Shaanxi Province, China (by Pang Jiangli)