

DOI: 10.11766/trxb201912270288

娄义宝, 史东梅, 江娜, 金慧芳, 叶青. 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1399–1410.

LOU Yibao, SHI Dongmei, JIANG Na, JIN Huifang, YE Qing. Effects of Soil Erosion on Soil Moisture and Infiltration Characteristics of Slope Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1399–1410.

## 土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响\*

娄义宝<sup>1, 2</sup>, 史东梅<sup>1†</sup>, 江娜<sup>1</sup>, 金慧芳<sup>1</sup>, 叶青<sup>1</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西北农林科技大学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, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 土壤水分对雨养农业坡耕地具有重要意义, 利用铲土侵蚀模拟试验小区, 对不同侵蚀程度坡耕地的土壤水分特征曲线、土壤入渗、土壤水库特征及抗旱性能进行研究。结果表明: (1) 土壤侵蚀程度加剧可以使相同吸力下土壤的容积含水量降低, 不利于坡耕地土壤的水分贮存, 使坡耕地土壤抗旱性能降低。紫色土坡耕地土壤入渗速率随着土壤侵蚀程度加剧, 0~10 cm 层土壤入渗速率逐渐降低, 同时随着土壤侵蚀程度加剧, 不同垂直深度上各个土层土壤入渗速率差异逐渐减小。(2) 不同侵蚀程度坡耕地土壤水库特征差异显著, 紫色土坡耕地土壤总库容随着土壤侵蚀程度加剧先呈现上升趋势, 土壤总库容的大小表现为  $S_{10} (422.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}) > S_5 (413.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}) > S_{15} (408.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}) > S_0 (404.9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}) > S_{20} (403.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 。随着侵蚀程度加剧紫色土坡耕地土壤水库无效水分有着不同程度的增加, 土壤侵蚀可以减小水库持水效率, 但侵蚀程度对水库持水效率影响不大。(3) 不同侵蚀坡耕地 0~40 cm 层土壤的各贮水特征之间差异不大, 同一土层深度不同侵蚀程度坡耕地最大吸持贮水量占饱和和贮水量的 75% 左右。随侵蚀程度加剧坡耕地土壤抗旱性变差, 相同吸力下, 不同侵蚀程度坡耕地耕层土壤累计损失水百分率随侵蚀程度加剧呈现不同程度的增加。研究结果可为地块尺度上紫色土坡耕地土壤水分和抗旱性能调控提供技术参数。

**关键词:** 坡耕地; 土壤侵蚀; 入渗; 水分特征曲线; 抗旱性能

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## Effects of Soil Erosion on Soil Moisture and Infiltration Characteristics of Slope Farmland

LOU Yibao<sup>1, 2</sup>, SHI Dongmei<sup>1†</sup>, JIANG Na<sup>1</sup>, JIN Huifang<sup>1</sup>, YE Qing<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】 Cultivated slopeland in the hilly areas of purple soil is an important erosion inflicted area in the Yangtze River Basin, where soil moisture is not only the main factor governing agricultural productivity of the land and crop growth in the area, but also an important one influencing the erosion process therein. Soil moisture is of great significance to rain-fed agricultural sloping farmlands. This study was to explore impacts of soil erosion on soil moisture and water

\* 国家自然科学基金项目 (41771310) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771310)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shidm\_1970@126.com

作者简介: 娄义宝 (1993—), 男, 辽宁大连人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: yibao93@126.com

收稿日期: 2019-12-27; 收到修改稿日期: 2020-03-31; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-05-21

infiltration in sloping farmlands, in an attempt to provide some parameters as a basis for control of soil water erosion in sloping farmlands in hilly purple soil areas. 【Method】 For this paper, a soil erosion simulation experiment was carried out on a shoveled plot of land, to explore soil water characteristic curves, water infiltration, soil water pool characteristics and drought resistance of the sloping farmland 0, 5, 10, 15 and 20 cm in depth. 【Result】 Results show: (1) Aggravation of soil erosion degree reduced volumetric water content of the soil that remained the same in suction, which is detrimental to water storage in the sloping farmland soil, leading to reduced drought resistance of the slopeland. Under the same suction force, soil volumetric moisture content decreased with aggravating soil erosion; when soil erosion occurred in the 0 to 20 cm soil layer, soil volumetric water content decreased by 7.8%~24.32%, or 17.80% on average. With aggravating soil erosion, soil water infiltration rate gradually decreased too in the 0~10 cm soil layer, and at the same time soil water infiltration rate tended to be similar in all soil layers regardless of vertical depth. (2) Soil water pool characteristics varied sharply with the degree of soil erosion. With aggravating soil erosion, the total soil water pool capacity tended to rise firstly, and exhibited an order of  $S_{-10}$  ( $422.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) >  $S_{-5}$  ( $413.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) >  $S_{-15}$  ( $408.2 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) >  $S_{-0}$  ( $404.9 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) >  $S_{-20}$  ( $403.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) by layer, and at the same time, ineffective portion of the water pool increased to a varying extent; soil erosion reduced water holding efficiency of the soil, which, however, almost had nothing to do with degree of the erosion. (3) Soil water pool characteristics in the 0~40 cm soil layer did not vary much from slopeland to slopeland different in soil erosion; the maximum water holding capacity accounts for 75% of the saturated water holding capacity in the soil layer the same in depth, regardless of erosion degree. With aggravating soil erosion cumulative water loss from the cultivated layer, under the same suction, increased by a varying degree, and displayed a rising trend on the whole, and a declining order, by layer, of  $S_{-10}$  >  $S_{-20}$  >  $S_{-15}$  >  $S_{-5}$  >  $S_{-0}$ ; This shows that under the same soil suction, the surface soil layer lost the least water and the 0~10 soil layer the most. 【Conclusion】 Soil erosion causes destruction of soil structure, thus reducing soil water infiltration, water retaining capacity, and drought resistance of sloping farmlands. All the findings in this research may serve as technical parameters for the regulation of soil moisture and drought resistance of farmlands on purple soil slopes on the plot scale.

**Key words:** Sloping cultivated land; Soil erosion; Infiltration; Water characteristic curve; Drought resistance

紫色丘陵区坡耕地是长江流域的重要侵蚀地带<sup>[1]</sup>, 紫色土具有易蚀性高、抗旱性差、养分缺乏、侵蚀土壤退化严重等特点<sup>[2]</sup>。土壤水分不仅是该区农用地生产力和农作物生长的主控因子, 也是侵蚀过程的重要影响因素<sup>[3]</sup>, 土壤水分是自然界水循环的不可忽略的重要组成部分, 而且土壤水分可以直接影响作物对土壤养分吸收和运转, 影响作物产量和品质<sup>[4]</sup>。土壤入渗与地表产流、降雨后土壤水分再分配、农田水分最优调控、土壤侵蚀、养分随水分的迁移、农业面源污染等问题密切相关<sup>[5-10]</sup>。杨永辉等<sup>[11]</sup>研究发现坡耕地经翻耕之后, 土壤结构遭到破坏且小雨强对于土壤的打击破坏作用小于大雨强, 即雨强越大, 雨滴对地表土壤的打击破坏越大, 降雨产生的径流携带侵蚀的土壤颗粒会堵塞地表土壤孔隙形成地表封闭或结皮, 从而使土壤的降雨入渗速率有所降低。李春茂等<sup>[12]</sup>对不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征研究中发现, 灌木林地的前期入渗率下降幅度最大, 而裸石地和梯田旱地相对

缓慢, 同时灌木林地能使土壤渗透性能得到明显改善, 在大量降雨后延缓了发生地表径流的时间, 降低了土壤侵蚀发生的可能性。张世熔等<sup>[13]</sup>根据田间观察资料和玉米产量, 结果表明紫色砂壤土和轻壤土的抗旱能力可用水吸力达 80 kPa 的大雨后天数来表达。刘恩斌和董水丽<sup>[14]</sup>对黄土高原几种典型土壤持水特性进行研究, 结果表明可以用有效水的含量及其失水累积百分率作为评价土壤持水性能及抗旱力的指标, 同时指出在低吸力下有一定量的水释出, 而且高吸力段还贮备了相当数量的有效水, 对于维持作物的正常生理活动具有一定的作用, 能够体现出明显的抗旱性。目前对土壤入渗性能研究多为不同土地利用方式<sup>[15-16]</sup>、不同耕作措施和在土壤中添加不同物质对土壤入渗的影响<sup>[17-19]</sup>, 而针对不同侵蚀程度下坡耕地土壤入渗及抗旱性能的研究较少, 此外土壤侵蚀导致土壤结构变差、土壤水分变化、入渗率变低, 对坡耕地土壤水分利用有重要的影响。因此本文以不同侵蚀程度紫色土坡耕地为研究对

象, 研究土壤侵蚀对坡耕地土壤水分和入渗特征的影响, 以此为紫色丘陵区坡耕地侵蚀土壤水分调控、坡耕地耕层培育以及雨养农业发展提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

重庆市坡耕地面积 118.9 万  $\text{hm}^2$ , 占全市耕地面积 47.14%,  $15^\circ\sim 25^\circ$  坡耕地 78.5 万  $\text{hm}^2$ ,  $25^\circ$  以上坡耕地 40.4 万  $\text{hm}^2$ , 紫色土是重庆市农耕地 (尤其是坡耕地) 面积分布最广的土壤类型。紫色土丘陵区坡耕地垦殖指数为 49.04%、复种指数为 180%, 土壤侵蚀模数在  $3\ 798\sim 9\ 831\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  之间<sup>[2]</sup>, 土壤侵蚀性退化严重。铲土侵蚀模拟小区位于重庆市万州区熊家镇, 土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质发育的中性紫色土, 农作物种植制度为油菜/玉米。

### 1.2 试验设计

铲土侵蚀模拟法属模拟试验研究, 即人为运用试验手段加速侵蚀过程, 通过铲除表土构建不同侵蚀程度小区开展研究, 模拟坡耕地土壤侵蚀过程中耕层土壤被剥蚀, 但耕作使耕层以下的一定厚度的土壤被翻起与原来耕层土壤混合, 下一年又剥蚀掉一定厚度的土层, 一定厚度的耕层以下土壤又被翻到耕层, 与原来耕层土壤混合, 其试验原理最接近坡面自然侵蚀过程。为反映坡耕地土壤侵蚀和耕作对耕层土壤影响的真实情况, 采用配土法<sup>[20]</sup>计算不同侵蚀深度耕层土壤构成特征, 根据公式计算不同侵蚀深度条件下耕层厚度土壤构成, 详见表 1。

$$m = h_0 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^n + h_1 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-1} + h_2 \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-2} + \dots + h_i \left(1 - \frac{d}{m}\right)^{n-i} + h_n \left(1 - \frac{d}{m}\right) + h_n, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中,  $h_i$  代表原始  $i$  土层的厚度;  $d$  为多年平均侵蚀厚度, 在此 0.25 cm (根据重庆紫色丘陵区土壤侵蚀情况, 多年平均侵蚀厚度为 0.25 cm);  $m$  为耕作厚度 (20 cm);  $n$  为侵蚀年限。

试验地划为 3 个区组, 每个区组随机布设不同侵蚀程度小区, 小区面积为  $12\ \text{m}^2$  (长 4 m × 宽 3 m); 顺坡布置在  $15^\circ$  坡面上, 四周用铁板插入地下做围挡 (地下 30 cm, 地上保留 15 cm), 不同侵蚀程度铲土侵蚀模拟小区各土层理化性质详见表 2。

### 1.3 土壤入渗测定及土壤水库计算

本文采用  $100\ \text{cm}^3$  环刀采集原状土样, 采取单环有压入渗法测定土壤的入渗特征参数<sup>[21]</sup>, 各样品分别重复 3 次。土壤是布满大小孔隙的疏松多孔体, 土层深厚的土壤具有显著的存蓄、调节水分的功能, 称之为土壤水库。土壤库容是土壤水库利用和调节的基础, 其大小与土壤类型、结构、质地和地下水埋深具有很大关系<sup>[22]</sup>。土壤水库的蓄水量可以按文献<sup>[23]</sup>计算, 设某时刻地表以下一定深度  $H$  处的土壤含水量为  $\theta(H)$ , 则该深度土层相应的蓄水量为:

$$W_a \int_0^H \theta(H) dH \quad (2)$$

式中,  $W_a$  为地表以下  $H$  深度土层的土壤蓄水量, mm。

表 1 坡耕地不同侵蚀程度原位模拟小区特征原始土层剩余厚度

Table 1 Thickness of the residual original soil layer in the plot of in situ simulation of soil erosion relative to erosion degree

编号 No.	模拟侵蚀深度 Simulated erosion depth/cm	模拟侵蚀年限 Simulated erosion age/a	耕层厚度 Top layer thickness/cm	原始不同土层 Original soil layers/cm				
				0~20	20~25	25~30	30~35	35~40
S <sub>0</sub>	0	0	20	20	—	—	—	—
S <sub>5</sub>	5	20	20	15.55	4.45	—	—	—
S <sub>10</sub>	10	40	20	12.09	3.46	4.45	—	—
S <sub>15</sub>	15	60	20	9.40	2.69	3.46	4.45	—
S <sub>20</sub>	20	80	20	5.50	3.90	2.69	3.46	4.45

表 2 不同侵蚀程度坡耕地耕层土壤理化特征

Table 2 Physical and chemical properties of the topsoil relative to erosion degree

编号 No.	土层 Soil layer/cm	土壤容重 Soil bulk density / (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率 Soil water content /%	机械组成 Mechanical composition /%			毛管孔隙度 Capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity /%	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )
				砂粒 Sand 1~0.05 mm	粉粒 Silt 0.05~0.001 mm	黏粒 Clay <0.001 mm			
S <sub>0</sub>	0~10	1.26	15.70	36.00	54.67	9.33	36.29	52.29	9.8
	10~20	1.32	18.49	36.00	48.00	16.00	35.72	50.13	8.3
	20~30	1.51	18.24	40.00	48.00	12.00	34.47	43.11	10.1
	30~40	1.54	16.86	37.33	52.00	10.67	34.01	41.83	5.2
S <sub>5</sub>	0~10	1.33	14.10	46.00	25.33	18.67	33.78	49.93	8.4
	10~20	1.35	16.59	28.00	54.67	17.33	39.53	48.98	7.7
	20~30	1.59	15.76	45.33	46.67	8.00	32.54	39.91	5.9
	30~40	1.50	16.24	48.00	38.00	14.00	34	43.27	6.4
S <sub>10</sub>	0~10	1.20	14.46	44.00	45.33	10.67	35.64	54.56	8.3
	10~20	1.35	16.41	42.67	42.67	14.67	35.67	48.99	8.5
	20~30	1.38	18.10	45.33	37.33	17.33	35.82	48.06	7.1
	30~40	1.52	18.28	36.00	48.00	16.00	36.63	42.54	6.5
S <sub>15</sub>	0~10	1.34	12.44	40.00	42.67	17.33	32.64	49.56	7.9
	10~20	1.28	18.06	48.00	34.67	17.33	37.89	51.74	9.2
	20~30	1.56	15.92	33.33	42.67	24.00	34.64	41.14	6.9
	30~40	1.54	16.29	56.00	34.67	9.33	33.72	42.07	4.8
S <sub>20</sub>	0~10	1.27	13.77	54.67	33.33	12.00	35.36	52.08	9.0
	10~20	1.35	16.95	44.00	37.33	18.67	36.85	49.11	7.6
	20~30	1.50	16.49	42.67	34.67	22.67	34.71	43.41	7.1
	30~40	1.49	16.15	58.67	30.67	10.67	35.25	43.70	5.0

土壤水库各种库容计算方法如下:

$$\text{总库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n (S_i \times r_i \times H_i) \quad (3)$$

$$\text{死库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n (W_i \times r_i \times H_i) \quad (4)$$

$$\text{兴利库容} = 0.1 \sum_{i=1}^n [(C_i - W_i) \times r_i \times H_i] \quad (5)$$

$$\text{滞洪库容} = 0.1 \sum_{i=1}^{i=h} [(S_i - C_i) \times r_i \times H_i] \quad (6)$$

$$\text{最大有效库容} = \text{总库容} - \text{死库容} \quad (7)$$

式中,  $W_i$  为凋萎持水量, %;  $r$  为土壤容重, g·cm<sup>-3</sup>;

$H$  为土层厚度, cm;  $n$  为土壤层次;  $C$  为田间持水量, %;  $S$  为饱和持水量, %。

土壤贮水特征计算<sup>[16]</sup>: 土壤饱和贮水量=最大吸持贮水量+最大滞留水量, 最大吸持贮水量=毛管孔隙度×土层厚度, 最大滞留水量=非毛管孔隙度×土层厚度。

水分特征曲线测定采用吸力平板仪, 吸力平板仪为中国科学院南京土壤所徐安富教授的专利技术产品, 每个样品分别重复 3 次。

## 2 结果

### 2.1 坡耕地耕层土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线表示在土壤水非饱和状态下土壤水的能态与数量间的关系, 是分析土壤水保持

和运动的最基本的因素之一<sup>[24]</sup>，能够表示土壤的基本特性，是进行土壤水分运动及溶质运移定量分析时必不可少的重要参数<sup>[25]</sup>。由图 1 可知，不同侵蚀程度紫色土坡耕地耕层土壤水分特征曲线存在较大差异。其中土壤水分特征曲线均在土壤吸力低于 100 cm 水柱时表现为，随土壤吸力的增大，土壤容积含水率变化幅度较大，均呈下降变化趋势；当土壤吸力在 100~300 cm 水柱时，土壤容积含水率则迅速下降；当土壤吸力大于 300 cm 水柱时，土壤容积含水率则呈现缓慢降低后逐渐趋于平缓，整体变化不大。总体上看，随着侵蚀程度加剧，在相同吸力下土壤容积含水率呈下降变化，当侵蚀程度由  $S_0$  加剧至  $S_{20}$  时，土壤容积含水率下降率介于 7.8%~24.32%，平均下降率为 17.80%；由此可以看出，土

壤侵蚀程度加剧可以使相同吸力下时土壤的容积含水量降低，不利于坡耕地土壤的水分贮存，使坡耕地土壤抗旱性能降低。

对于不同侵蚀程度的坡耕地地块而言，不同垂直深度上，土壤容积含水率随土壤吸力增大，各土层间差异越明显。其中  $S_0$  表现为在土壤吸力低于 100 cm 水柱时，随着土壤吸力增加，土壤容积含水率下降缓慢，各土层规律表现为： $10\sim 20\text{ cm} > 0\sim 10\text{ cm} > 20\sim 30\text{ cm} > 30\sim 40\text{ cm}$ ；其中  $10\sim 20\text{ cm}$  和  $0\sim 10\text{ cm}$  层降低最多， $20\sim 30\text{ cm}$  和  $30\sim 40\text{ cm}$  层则线型变化平缓。 $S_5$  和  $S_{10}$  坡耕地表现出相同规律，均呈现  $0\sim 10\text{ cm} > 10\sim 20\text{ cm} > 20\sim 30\text{ cm} > 30\sim 40\text{ cm}$ ，这说明相同吸力条件下坡耕地表层土壤的容积含水率较高。

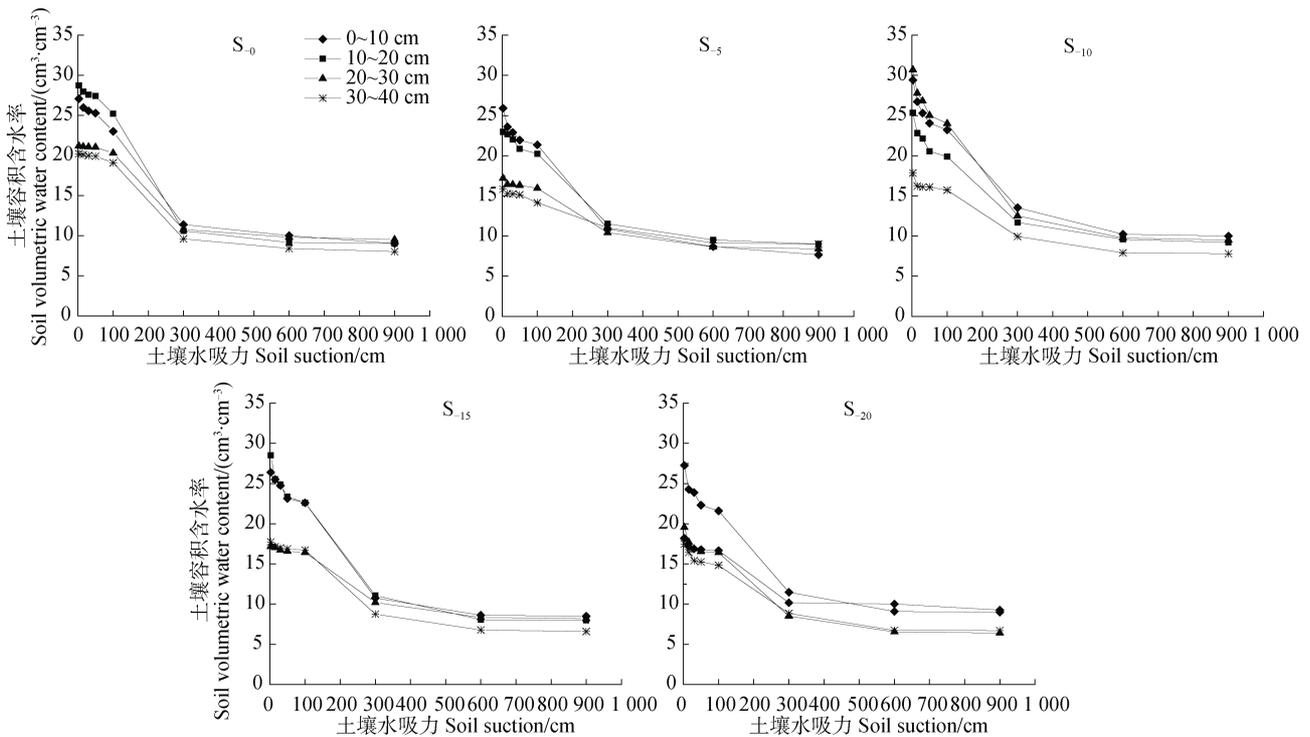


图 1 不同侵蚀程度坡耕地土壤容积含水率变化

Fig. 1 Variation of soil water content in sloping farmland with erosion degree

## 2.2 坡耕地耕层土壤入渗特征

土壤水分入渗是降水、地表水转化为土壤水、地下水的关键环节，同时土壤入渗与坡耕地地表径流的产生和土壤侵蚀均有密切关系，直接影响到坡耕地土壤质量和生产性能。由图 2 可知，不同侵蚀程度坡耕地土壤入渗速率存在差异，总体表现为随时间的变化，土壤入渗速率先迅速减小随后减小速

率变慢最后逐渐趋于平缓。 $S_0$  坡耕地耕层土壤层入渗情况总体表现为  $0\sim 10\text{ cm} > 30\sim 40\text{ cm} > 20\sim 30\text{ cm} > 10\sim 20\text{ cm}$ ，出现此规律可能是由于耕作活动的影响导致表层 ( $0\sim 10\text{ cm}$ ) 土壤孔隙丰富，土壤入渗速率明显大于其他土层，耕作机具压实作用使  $10\sim 20\text{ cm}$  层和  $20\sim 30\text{ cm}$  层土壤紧实入渗速率小于  $30\sim 40\text{ cm}$  层。其中  $0\sim 10\text{ cm}$  层和  $30\sim 40\text{ cm}$  层入渗率

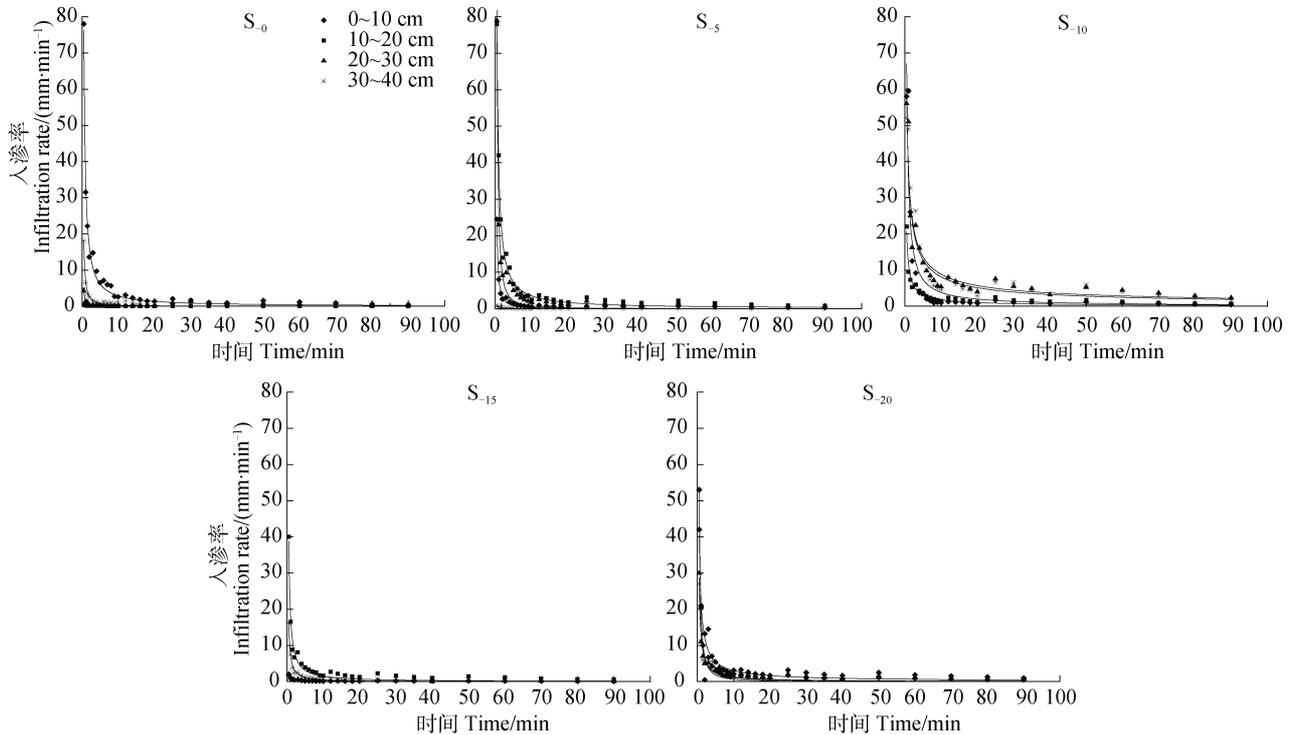


图2 不同侵蚀程度坡耕地土壤入渗特征

Fig. 2 Characteristics of soil infiltration in sloping farmland relative to erosion degree

在前 10 min 内迅速降低, 其中分别由 78.00 下降至 2.60  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、18.00 下降至 0.70  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 随后逐渐趋于稳定; 10~20 cm 层和 20~30 cm 层土壤入渗率变化不大, 在 4.24~0.02  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  之间变化。

$S_5$  坡耕地土壤层入渗率表现为 10~20 cm > 20~30 cm > 0~10 cm > 30~40 cm, 且除 30~40 cm 层外其余土层均在前 10 min 内迅速降低, 分别下降了 78.58、81.36 和 24.05  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 30~40 cm 层变化不大, 前 10 min 下降了 0.77  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。 $S_{10}$  坡耕地土壤层入渗率总体上表现为 30~40 cm > 20~30 cm > 10~20 cm > 0~10 cm, 在 30 min 内下降较快, 随后不同土层土壤入渗率均趋于不同的稳定值。前 30 min 内, 30~40 cm 层和 20~30 cm 层土壤入渗率分别在 51~5.5  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、49~6.57  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  之间变化, 10~20 cm 层和 0~10 cm 层土壤入渗率分别在 22~1.6  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  和 26~1.15  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  之间变化。 $S_{15}$  坡耕地土壤层入渗率表现为 10~20 cm > 30~40 cm > 20~30 cm > 0~10 cm, 其中 20~30 cm 层和 0~10 cm 层土壤入渗率差异不大。 $S_{20}$  坡耕地表现为不同垂直深度上 10~20 cm 层土壤入渗率最大, 其余土层间土壤入渗率差异不大。

总体来看, 紫色土坡耕地土壤入渗速率随着土壤侵蚀程度加剧, 0~10 cm 层土壤入渗速率逐渐降低, 最后趋于稳定, 可能一方面是由于土壤侵蚀导致表层土壤结构发生板结, 土壤孔隙减少, 使表层土壤入渗速率逐渐减小; 另一方面是由于水流将表层土壤的细颗粒运移堵塞孔隙, 土壤入渗速率逐渐减小。同时随着土壤侵蚀程度加剧, 不同垂直深度上各土层土壤入渗速率差异逐渐减小。

### 2.3 坡耕地耕层土壤水库特征

土壤水库对作物供水的调节功能具有重要的生产意义, 可以在一定程度上缓解农作物在干旱季节的需水问题<sup>[26]</sup>。由表 3 可知, 不同侵蚀程度坡耕地土壤水库特征差异显著, 土壤总库容的大小表现为  $S_{10} > S_5 > S_{15} > S_0 > S_{20}$ , 可以看出紫色土坡耕地土壤总库容随着土壤侵蚀程度加剧先呈现上升趋势, 在  $S_{10}$  处达到最大值, 随后又表现下降趋势。土壤死库容的大体规律与总库容变化规律总体上相似, 均为先上升后下降, 且在  $S_{10}$  处达最大值, 依次为  $S_{10} > S_{20} > S_5 > S_{15} > S_0$ , 随着侵蚀程度加剧紫色土坡耕地土壤水库无效水分有着不同程度增加, 其中  $S_{10}$  土壤无效水库增加最多, 增加了 7.3%, 其余侵

表 3 不同侵蚀程度坡耕地土壤水库变化特征

Table 3 Characteristics of soil water pool in sloping farmland relative to erosion degree

编号 No.	土层 Soil layer /cm	总库容 Total storage capacity / (t·hm <sup>-2</sup> )	死库容 Dead storage capacity/ (t·hm <sup>-2</sup> )	兴利库容 Active storage capacity/ (t·hm <sup>-2</sup> )	滞洪库容 Flood detention storage capacity/ (t·hm <sup>-2</sup> )		最大有效库容 Maximum effective capacity / (t·hm <sup>-2</sup> )	土壤实际库容 Actual soil storage / (t·hm <sup>-2</sup> )	水库持水效率 Reservoir water holding efficiency /%
S <sub>0</sub>	0~10	461.04±49.56	166.42±15.17	290.81±27.37	97.5±28.12	294.62±34.46	199.19±29.75	43.98±10.78	
	10~20	433.40±43.80	155.88±17.66	317.04±80.03	76.03±51.82	277.51±26.33	244.59±33.19	57.25±12.55	
	20~30	368.80±19.06	124.73±12.70	394.32±15.14	23.60±5.35	244.06±6.43	275.31±24.27	75.01±10.47	
	30~40	356.45±13.54	117.03±8.47	407.13±20.01	16.23±0.85	239.43±5.98	260.21±23.48	73.09±7.58	
S <sub>5</sub>	0~10	439.17±47.49	158.08±17.25	288.47±42.75	100.79±33.36	281.09±30.36	187.08±36.09	43.24±11.08	
	10~20	452.90±62.68	162.33±23.62	370.06±50.98	57.56±35.39	290.58±39.28	224.21±33.71	50.83±14.90	
	20~30	372.48±65.67	118.10±41.57	394.81±35.11	46.74±32.04	254.38±25.69	246.65±52.81	67.06±16.27	
	30~40	375.35±42.93	126.96±26.50	383.05±42.55	35.33±25.65	248.38±16.42	245.4±49.81	66.57±20.89	
S <sub>10</sub>	0~10	465.70±6.64	169.02±1.60	260.49±33.23	108.64±18.04	296.68±5.14	174.62±33.83	37.52±7.39	
	10~20	412.63±43.33	148.16±19.31	331.14±16.50	50.75±17.95	264.47±24.17	220.60±12.22	53.68±3.49	
	20~30	416.09±28.58	149.97±12.9	343.21±49.23	57.73±24.62	266.12±15.89	248.53±9.79	60.01±6.15	
	30~40	382.92±11.34	131.54±8.27	426.45±38.19	16.57±14.75	251.38±3.07	278.55±17.84	72.85±6.82	
S <sub>15</sub>	0~10	426.30±18.00	155.17±7.25	282.56±77.46	99.91±39.83	271.14±10.85	167.53±58.67	39.2±13.52	
	10~20	481.65±58.27	174.69±19.44	310.8±67.51	98.34±9.31	306.95±38.83	231.11±48.69	47.66±4.07	
	20~30	368.26±34.11	121.45±21.46	417.94±33.94	20.75±5.01	246.81±13.05	248.17±15.10	67.78±7.32	
	30~40	356.60±29.27	117.11±16.54	400.29±25.99	19.15±6.63	239.49±13.01	250.48±31.77	70.32±7.54	
S <sub>20</sub>	0~10	438.98±5.83	160.54±2.14	288.78±36.26	83.80±23.02	278.43±3.69	174.9±8.24	39.86±2.16	
	10~20	428.62±31.08	155.20±12.20	341.31±37.31	59.90±24.60	273.42±18.88	229.03±24.32	53.87±9.14	
	20~30	371.89±3.64	127.19±0.93	393.45±28.23	24.73±10.30	244.70±2.77	247.26±14.07	66.47±3.28	
	30~40	374.33±19.18	128.17±11.95	397.09±19.66	21.75±5.77	246.16±7.72	240.52±12.71	64.32±3.55	

注：“±”代表“正负”。Note: “±” stands for “positive and negative”.

蚀程度坡耕地则增加不明显；这表明当侵蚀程度为 10 cm 时紫色土坡耕地土壤水库水分循环利用较低。不同侵蚀程度坡耕地兴利库容随侵蚀程度加剧呈“凹”形变化，表现为  $S_{-5} > S_{-20} > S_{-15} > S_{-0} > S_{-10}$ ，这表明当发生侵蚀时可以一定程度上增加耕层土壤的蓄水能力，减少了地表径流的形成。不同侵蚀程度坡耕地水库持水效率表现为  $S_{-0}$  最大，因此土壤侵蚀可以减小水库持水效率，但侵蚀程度对水库持水效率影响不大。

对于不同侵蚀程度的坡耕地地块而言，在垂直深度上，不同侵蚀程度坡耕地土壤总库容、死库容、

最大有效库容和滞洪库容表现为上两层（0~10 cm、10~20 cm）大于下两层（20~30 cm、30~40 cm），兴利库容则表现的与规律上述各土壤水库相反。当土层由 0~10 cm 变化至 30~40 cm 时，不同侵蚀程度坡耕地土壤滞洪库容减少最多，其中  $S_{-10}$  坡耕地减少最长达 85%， $S_{-5}$  坡耕地减少最少，也达 65%；其次为死库容和土壤实际库容，总体在 174.7~117.0 t·hm<sup>-2</sup> 和 278.5~167.5 t·hm<sup>-2</sup> 之间变化，减小率均在 20%~38% 之间变化；最后为土壤总库容和最大有效库容，由此可以看出土壤垂直深度的变化对土壤各土层间滞洪库容影响较大，其次为土壤死

库容和土壤实际库容, 对各土层间的土壤总库容、最大有效库容影响较小, 且坡耕地 (除  $S_{15}$ ) 各土层间土壤各水库的变化率随着土壤侵蚀程度的加剧呈减小率呈下降趋势, 这是由于侵蚀造成坡耕地表层土壤水库变化较大的原因导致。

#### 2.4 坡耕地耕层土壤抗旱性能

土壤水分贮量能力是评价土壤水分状况的一项重要指标, 主要是由孔隙状况以及土层深度决定的<sup>[27]</sup>。由图 3 可知, 不同侵蚀坡耕地 0~40 cm 层土壤的各贮水特征之间差异不大。最大吸持贮水量在 139~144 mm 之间变化, 最大滞留水量在 42~50 mm 之间变化, 饱和贮水量在 182~194 mm 之间变化, 相同

土层深度下不同侵蚀程度坡耕地, 最大吸持贮水量占饱和贮水量的 75%左右。如果考虑坡耕地总土层厚度时, 坡耕地土壤则贮水量则将表现出很大的差异。通过土壤贮水量计算公式可知, 土壤贮水量不仅和土壤孔隙度有关, 还和土层深度有直接的关系。因此当土壤土壤侵蚀程度越大, 坡耕地地表土损失越多, 坡耕地贮水量也随着土壤侵蚀程度的加剧发生减少, 即坡耕地侵蚀越大土壤损失的越多, 坡耕地的贮水量也相应的损失越多, 侵蚀程度越大抗旱性越差, 相关研究表明<sup>[28]</sup>, 20 cm 厚紫色土蓄水量仅为 60 cm 厚土壤蓄水量的 1/3, 且 20~40 cm 厚土层蓄水量远远不能满足作物生长的需要。

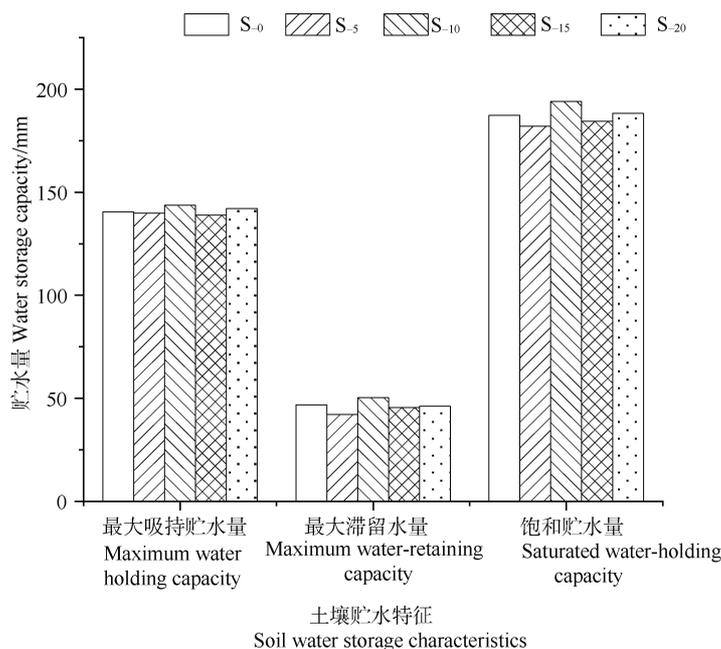


图 3 不同侵蚀程度坡耕地 0~40 cm 土壤贮水特征

Fig. 3 Characteristics of water storage in the 0~40 cm soil layer of sloping farmland relative to erosion degree

根据土壤水分特征曲线求得不同吸力段不同侵蚀程度坡耕地各土层土壤累积失水百分率 (表 4)。不同侵蚀程度坡耕地在土壤吸力达到 900 cm 时, 土壤累积失水百分率在 43.16~71.95 之间变化, 最大值出现在  $S_{15}$  的 10~20 cm 层, 最小值出现在  $S_{20}$  的 10~20 cm 层。相同吸力下, 坡耕地耕层土壤累计损失水百分率随侵蚀程度加剧有不同程度的增加, 整体上呈增大的变化, 其中  $S_{10}$  坡耕地土壤失水百分率最大, 随后为  $S_{20}$ 、 $S_{15}$  坡耕地,  $S_0$  坡耕地土壤失水百分率最小, 依次表现为  $S_{10} > S_{20} > S_{15} > S_5 > S_0$ , 这说明在相同土壤吸力下,  $S_0$  土壤失水

最少,  $S_{10}$  土壤失水最多, 随侵蚀程度加剧坡耕地土壤抗旱性变差。

在垂直深度上, 同一侵蚀程度相同吸力下, 不同土层土壤累积失水百分率表现为随土层深度的加深逐渐减小 (除  $S_{15}$ ), 表现为 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm > 30~40 cm, 这说明坡耕地土壤抗旱性随土层深度加深逐渐增强, 0~10 cm 层土壤抗旱性最差, 其次为 10~20 cm 层, 30~40 cm 层土壤抗旱性最强, 因此在坡耕地抗旱过程中防治坡耕地表层土壤的水分损失, 可通过增加地表覆盖等措施进行改善。

表 4 不同侵蚀程度坡耕地土壤累积失水百分率

Table 4 Cumulative water loss from sloping farmland relative to erosion degree/%

编号 No.	土层 Soil layer/cm	土壤水吸力 Soil water suction						
		15 cm	30 cm	50 cm	100 cm	300 cm	600 cm	900 cm
S <sub>0</sub>	0~10	4.07	5.62	6.61	15.02	58.00	63.09	66.75
	10~20	2.69	4.03	4.67	12.38	63.18	68.23	68.70
	20~30	0.50	0.57	0.76	4.25	49.30	53.74	55.16
	30~40	0.49	1.17	1.61	5.60	52.55	58.51	60.42
S <sub>5</sub>	0~10	8.91	11.67	15.32	17.58	58.00	66.49	70.39
	10~20	1.20	4.15	9.22	11.91	49.81	58.55	60.81
	20~30	4.42	4.60	5.06	7.25	39.41	49.75	51.16
	30~40	3.55	3.74	4.44	10.63	30.41	42.23	43.16
S <sub>10</sub>	0~10	9.15	13.98	18.22	21.07	54.01	65.25	66.00
	10~20	10.01	12.68	18.89	21.57	53.85	62.18	63.70
	20~30	9.49	12.66	18.48	21.79	59.24	68.23	69.05
	30~40	9.25	9.83	9.94	11.99	44.28	55.66	56.30
S <sub>15</sub>	0~10	3.39	6.23	12.31	14.41	59.26	67.38	67.81
	10~20	10.50	12.76	17.97	20.70	61.15	71.75	71.95
	20~30	0.63	2.51	3.39	4.16	40.54	51.41	52.20
	30~40	3.32	4.24	5.01	5.79	50.71	61.84	62.83
S <sub>20</sub>	0~10	10.99	12.36	18.17	20.77	57.90	66.69	66.98
	10~20	5.67	7.33	7.84	8.41	44.13	45.00	49.13
	20~30	9.39	13.68	15.29	16.03	56.50	66.49	67.26
	30~40	5.93	11.89	12.68	15.17	49.41	61.52	61.65

### 3 讨 论

土壤入渗对坡面水土流失有着直接影响，土壤入渗速率决定着地表径流，对水土流失作用有着直接的影响<sup>[5]</sup>，坡面产流机理主要有三种：超渗产流、蓄满产流以及两者混合的产流理论<sup>[29]</sup>。由本文中不同侵蚀程度坡耕地土壤入渗情况可知，侵蚀程度由 0 增加至 20 cm，初始入渗率由 47.2 mm·min<sup>-1</sup> 下降至 24.61 mm·min<sup>-1</sup>，下降了 48%，土壤侵蚀使土壤初始入渗率明显下降；由此可知，当强降雨、超渗产流发生时，侵蚀程度大的坡耕地先产生地表径流，发生土壤侵蚀，造成恶性循环。相关研究<sup>[30]</sup>表明无明显侵蚀的土壤的水分入渗量和入渗速率最大，并随着侵蚀程度的加剧入渗量和入渗速度逐渐减小。不同侵蚀程度的土壤水分入渗量的差别随着入渗时间的延长而加大；不同侵蚀土壤的起始入渗速率差

异更为明显。丁文斌等<sup>[31]</sup>对不同区域紫色土坡耕地的研究中表明当土壤水分在 0~20 cm 土层蓄满可导致具有一定流速的壤中流产生，可将在土壤结构中起胶结作用的细粒物质携带出土壤体之外，形成浑浊的、具有一定含沙量的壤中流，是紫色丘陵区水力侵蚀导致坡耕地耕层土壤退化的主要原因。杨永辉等<sup>[11]</sup>研究发现耕作破坏了土壤结构，易使表层土壤产生结皮，降低土壤入渗速率，导致径流量增大，土壤侵蚀加剧。与撂荒地相比，各种雨强条件下坡耕地的稳定入渗率均较撂荒地明显降低。林代杰等<sup>[15]</sup>不同土地利用方式研究中表明，红叶李林入渗特征最好，可以有效延缓地表径流的产生，抑制土壤侵蚀，有利于水土保持。黑土的研究<sup>[32]</sup>表明，0~35 cm 土层的最大储水能力为 227.5 mm，此层 10 年平均土壤含水量为 84 mm，所能接纳单次最大降雨量为 143.5 mm 而不产生径流。因此对于紫色土

坡耕地, 应改良土壤结构增加土壤入渗率, 当降雨发生时前期土壤入渗速率大, 可延缓产流, 同时可减少水土流失, 抑制土壤侵蚀。

土壤总库容值的大小与土壤孔隙有一定的关系, 由于紫色土具有粗骨化的特性, 土壤侵蚀造成侵蚀后的坡耕地土壤的孔隙整体上有不同程度的增加, 出现  $S_0$  土壤总库容不是最高的现象。同时土壤侵蚀造成土壤结构破坏, 对水分的蓄持能力变差, 因此表现出  $S_0$  土壤失水最少,  $S_{10}$  土壤失水最多的规律。此外研究表明<sup>[33]</sup>, 土壤基本理化性质如有机质含量、黏粒含量、物理性黏粒含量、土壤分散系数等均影响土壤水库库容。因此, 在后续的研究中应该继续关注此问题, 以更为准确地反土壤侵蚀对坡耕地土壤水库的影响, 提高坡耕地水分调控的实践性。

## 4 结 论

土壤侵蚀程度加剧可以使相同吸力下时土壤容积含水量降低, 不利于坡耕地土壤的水分贮存, 使坡耕地土壤抗旱性能降低。不同侵蚀程度坡耕地, 相同吸力下土壤容积含水率随着侵蚀程度加剧呈下降变化。紫色土坡耕地土壤入渗速率随着土壤侵蚀程度加剧, 0~10 cm 层土壤入渗速率逐渐降低, 同时随着土壤侵蚀程度加剧, 不同垂直深度上各个土层土壤入渗速率差异逐渐减小。不同侵蚀程度坡耕地土壤水库特征差异显著, 紫色土坡耕地土壤总库容随着土壤侵蚀程度加剧先呈现上升趋势。随着侵蚀程度加剧紫色土坡耕地土壤水库无效水分有着不同程度的增加, 土壤侵蚀可以减小水库持水效率, 但侵蚀程度对水库持水效率影响不大。不同侵蚀坡耕地 0~40 cm 层土壤的各贮水特征之间差异不大, 相同土层深度下不同侵蚀程度坡耕地, 最大吸持贮水量占饱和贮水量的 75%。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhao X J, Liu D H. Soil management and soil and water conservation of dryland agriculture in Sichuan Purple Hilly[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 ( 5 ): 6—10, 16. [赵燮京, 刘定辉. 四川紫色丘陵区旱作农业的土壤管理与水土保持[J]. 水土保持学报, 2002, 16 ( 5 ): 6—10.]
- [ 2 ] He Y R. Purple soils in China ( II ) [M]. Beijing: Science Press, 2003: 2211. [何毓蓉. 中国紫色土 ( II ) [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 2211.]
- [ 3 ] Cui L Z, Ding W F, Li Z B. Study on soil moisture dynamic variation law of farmland in purple soil hilly region[J]. Ecology and Environment, 2000, 9 ( 3 ): 207—209. [崔灵周, 丁文峰, 李占斌. 紫色土丘陵区农用地土壤水分动态变化规律研究[J]. 生态环境, 2000, 9 ( 3 ): 207—209.]
- [ 4 ] Zhang H Y, Sun M, Gao Z Q, et al. Relationship between soil water variation, wheat yield and grain protein and its components contents under sub-soiling during the fallow period plus mulched-sowing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51 ( 15 ): 40—51. [张慧芋, 孙敏, 高志强, 等. 旱地麦田深松蓄水和覆盖播种土壤水分变化与小麦籽粒蛋白质含量的关系[J]. 中国农业科学, 2018, 51 ( 15 ): 40—51.]
- [ 5 ] Pan J J. Determination of soil erosion class using soil infiltration rate and soil shear resistance[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1995, 9 ( 2 ): 93—96. [潘剑君. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级[J]. 水土保持学报, 1995, 9 ( 2 ): 93—96.]
- [ 6 ] Wang Z N, Wang X P, Liu B. Rainfall and soil moisture redistribution induced by xerophytic shrubs in an arid desert ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 ( 3 ): 755—760. [王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配[J]. 应用生态学报, 2016, 27 ( 3 ): 755—760.]
- [ 7 ] Bao H, Hou L Z, Liu J T, et al. Experiment on process of soil water infiltration and redistribution under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 ( 7 ): 70—75. [包含, 侯立柱, 刘江涛, 等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27 ( 7 ): 70—75.]
- [ 8 ] Shen Y T, Guo C J, Li H Q, et al. Effect of rainfall duration on nutrient loss of black soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 ( 2 ): 97—101. [沈奕彤, 郭成久, 李海强, 等. 降雨历时对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30 ( 2 ): 97—101.]
- [ 9 ] Wang H, Wang Q J, Shao M A. Laboratory experiments of soil nutrient transfer in the loess slope with surface runoff during simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 ( 6 ): 39—44. [王辉, 王全九, 邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22 ( 6 ): 39—44.]
- [ 10 ] Zhou H, Li B G, Lü Y Z, et al. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 ( 6 ): 1094—1100. [周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报, 2010, 47 ( 6 ): 1094—1100.]
- [ 11 ] Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1624—1630. [杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1624—1630.]
- [ 12 ] Li C M, Xu Q X, Wu P, et al. Simulation analysis on soil infiltration under different land use in Karst hillsides[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 47—52, 60. [李春茂, 徐勤学, 吴攀, 等. 不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 47—52, 60.]
- [ 13 ] Zhang S R, Liu S Q, Xia J G, et al. Study on drought-resistant indexes of purple soil in central hill region of Sichuan basin[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(S1): 104—109. [张世熔, 刘世全, 夏建国, 等. 川中丘陵区紫色土抗旱指标研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(S1): 104—109.]
- [ 14 ] Liu E B, Dong S L. Evaluation on water capacity and antidrought of main soils in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(S1): 21—27. [刘恩斌, 董水丽. 黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J]. 水土保持通报, 1997, 17(s1): 21—27.]
- [ 15 ] Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 33—36. [林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 33—36.]
- [ 16 ] Liu J, Li X W, Ji Z H, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2331—2340. [刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2331—2340.]
- [ 17 ] Li S L, Wang X, Wang S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 135—144. [李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 135—144.]
- [ 18 ] Yu B, Yu X F, Gao J L, et al. Change in hydraulic properties of soils amended with biochar following plough of straw stalk into deep soil horizon[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 25—32. [于博, 于晓芳, 高聚林, 等. 秸秆全量深翻还田和施加生物炭对不同土壤持水性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 25—32.]
- [ 19 ] Wang Z, Feng H. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 75—80. [王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75—80.]
- [ 20 ] Wang Z Q, Liu B Y, Wang X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2009, 39(10): 1397—1412. [王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(10): 1397—1412.]
- [ 21 ] Soil Physics Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Method for determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978. [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [ 22 ] Jin M G, Zhang R Q, Fang L Y, et al. Study on evaluation of soil water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(8): 30—34. [靳孟贵, 张人权, 方连玉, 等. 土壤水资源评价的研究[J]. 水利学报, 1999, 30(8): 30—34.]
- [ 23 ] Sun S J, Ding Y Y, Cao B, et al. Research on pondage capacity of soil reservoir in the representative well-irrigation fields of Beijing plain[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(1): 42—47. [孙仕军, 丁跃元, 曹波, 等. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 42—47.]
- [ 24 ] Chen X W, Zhang X P, Liang A Z, et al. Tillage effects on soil pore size distribution and soil moisture in Northeast China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 114—120. [陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 114—120.]
- [ 25 ] Teng Y, Zhang Z X, Si Z J, et al. Impact of vibration-tillage of subsoils on their water retention curves[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 52—58. [滕云, 张忠学, 司振江, 等. 振动深松耕作对不同类型土壤水分特征曲线影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 52—58.]
- [ 26 ] Li Y S. The function and role of soil reservoirs[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983, 3(5): 27—30. [李玉山. 土壤水库的功能和作用[J]. 水土保持通报, 1983, 3(5): 27—30.]
- [ 27 ] Zhuang J P, Wang W. Studies on the relationship between soil water-retention characters in low suction range and the early stage of soil drought[J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 306—313. [庄季屏, 王伟. 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 306—313.]
- [ 28 ] Zhu B, Chen S, You X, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 743—749. [朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 743—749.]
- [ 29 ] Huang M B, Li Y S, Kang S Z. Analysis of unit rainfall runoff theory and calculation of average infiltration ratio on

- slope land[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 13 ( 1 ): 63—68. [黄明斌, 李玉山, 康绍忠. 坡地单元降雨产流分析及平均入渗速率计算[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 13( 1 ): 63—68.]
- [ 30 ] Cai Z F, Lin J L, Huang Y H, et al. Soil erosion and degeneration in the south Fujian II. Influence of soil erosion on the soil moisture permeability and the main chemical characteristics[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2002, 17 ( 2 ): 69—73. [蔡志发, 林敬兰, 黄炎和, 等. 闽南土壤侵蚀与退化研究 II. 土壤侵蚀对土壤水分入渗和主要化学性质的影响[J]. *福建农业学报*, 2002, 17 ( 2 ): 69—73.]
- [ 31 ] Ding W B, Jiang G Y, Shi D M, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 ( 19 ): 6480—6493. [丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37 ( 19 ): 6480—6493.]
- [ 32 ] Han X Z, Zou W X, Lu X C, et al. The soil cultivated layer in dryland and technical patterns in cultivating soil fertility[J]. *Soil and Crop*, 2015, 4 ( 4 ): 145—150. [韩晓增, 邹文秀, 陆欣春, 等. 旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J]. *土壤与作物*, 2015, 4( 4 ): 145—150.]
- [ 33 ] Liang Y L, He B H, Wang T. Influence of newly built terraces on soil reservoir storage capacity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 ( 3 ): 324—330. [梁艳玲, 何丙辉, 王涛. 新修坡改梯对土壤水库库容的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 ( 3 ): 324—330.]

( 责任编辑: 檀满枝 )