

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.010.

郁耀闯, 杨树瑶, 王长燕, 等. 宝鸡地区  $L_1-S_5$  黄土和古土壤水分入渗及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 78-85.

Yu Yaochuang, Yang Shuyao, Wang Zhangyan, et al. Water Infiltration and Influencing Factors of  $L_1-S_5$  Loess-Paleosol in Baoji[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 78-85.

## 宝鸡地区 $L_1-S_5$ 黄土和古土壤水分入渗及影响因素

郁耀闯<sup>1,2,3</sup>, 杨树瑶<sup>1,3</sup>, 王长燕<sup>1,3</sup>, 龚兰兰<sup>1,3</sup>,  
赵景波<sup>2</sup>, 任媛媛<sup>1,3</sup>, 徐秋月<sup>1,3</sup>, 侯英<sup>1,3</sup>

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 宝鸡 陕西 721013; 2. 中国科学院 地球环境研究所

黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 3. 陕西省灾害监测与机理模拟实验室, 宝鸡 陕西 721013)

**摘要:** [目的] 探究宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤层水分稳定入渗率变化特征及其与土壤容重、土壤初始含水量和土壤毛管孔隙度等土壤属性的关系, 为揭示宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤的入渗规律提供参考依据。[方法] 运用双环法进行入渗试验, 探讨了宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤水分入渗的变化特征及其影响因素。[结果] (1) 宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  黄土层的平均稳定入渗率 (2.38 mm/min) 大于古土壤层的平均稳定入渗率 (1.55 mm/min), 其差异的原因可能与形成时的气候与风化成壤作用的强弱有关。(2)  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤层水分入渗试验过程可以用考斯加可夫和通用经验公式进行很好地拟合。(3) 土壤容重、土壤初始含水量和土壤毛管孔隙度等土壤属性是影响  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤层水分稳定入渗率变化的重要因素。(4) 利用土壤容重、土壤毛管孔隙度和毛管最大持水量等土壤参数可以很好地模拟宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤层的土壤稳定入渗率 ( $R^2=0.88$ ,  $NSE=0.88$ )。[结论] 宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤层水分稳定入渗率的变化主要由土壤容重、土壤初始含水量和土壤毛管孔隙度等土壤属性的变化所致, 利用上述土壤参数可以较好地模拟该区中晚更新统  $L_1-S_5$  黄土和古土壤层土壤稳定入渗率的变化。

**关键词:** 土壤入渗; 黄土和古土壤; 古气候变化; 中晚更新统; 宝鸡地区

**中图分类号:** S152.7; P641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)06-0078-08

## Water Infiltration and Influencing Factors of $L_1-S_5$ Loess-Paleosol in Baoji Region

Yu Yaochuang<sup>1,2,3</sup>, Yang Shuyao<sup>1,3</sup>, Wang Changyan<sup>1,3</sup>, Gong Lanlan<sup>1,3</sup>,  
Zhao Jingbo<sup>2</sup>, Ren Yuanyuan<sup>1,3</sup>, Xu Qiuyue<sup>1,3</sup>, Hou Ying<sup>1,3</sup>

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji,

Shaanxi 721013, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth

Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Key Laboratory of Disaster Monitoring and

Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

**Abstract:** [Objective] In order to provide a reference for revealing the infiltration law of the  $L_1-S_5$  layers of the Baoji loess-paleosol profiles in the middle and late Pleistocene, the variation characteristics of water stable infiltration rate of  $L_1-S_5$  loess and paleosol in Baoji Middle Late Pleistocene Series and its relationship with soil properties such as soil bulk density, initial soil water content and soil capillary porosity are explored. [Methods] The characteristics and its influencing factors of stable infiltration rate of loess and paleosol in the middle and late Pleistocene of Baoji were studied by double ring method. [Results] (1) The average stable infiltration rate (2.38 mm/min) of the loess is higher than that of the paleosol (1.55 mm/min) in the middle and late Pleistocene of the  $L_1-S_5$  layers of the Baoji loess-paleosol profile, which may be related to the

收稿日期: 2022-08-26

修回日期: 2022-09-22

资助项目: 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室项目 (SKLLQG1934); 国家自然科学基金 (41771048); 宝鸡文理学院博士科研启动费项目 (ZK2017042)

第一作者: 郁耀闯 (1980—), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化及气溶胶研究。E-mail: yuyaochuang@126.com

通信作者: 王长燕 (1979—), 女, 山东烟台人, 博士, 副教授, 主要从事黄土与第四纪地质研究。E-mail: weyxa\_1979@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

climate change at the time of formation and the strength of the weathering soil. (2) The infiltration experiment of loess and paleosol can be well fitted by using Kosgakov and general empirical formulas in the  $L_1-S_5$  layers of the Baoji loess-paleosol profile in the middle and late Pleistocene. (3) Soil properties, such as soil bulk density, initial soil water content, saturated soil water content and so on are important factors affecting the stable infiltration rate of loess and paleosol in the  $L_1-S_5$  layers of the middle and late Pleistocene of Baoji. (4) The soil stable infiltration rate ( $R^2=0.88$ ,  $NSE=0.88$ ) of loess and paleosol in the  $L_1-S_5$  layers of the Baoji loess-paleosol profile in the middle and late Pleistocene can be well simulated by using such parameters as soil bulk density, soil capillary porosity, maximum capillary water capacity, total soil porosity, soil saturated water content and soil initial water content. [Conclusion] The changes of stable water infiltration rate of loess and paleosol are mainly caused by the changes of soil bulk density, initial soil water content and capillary porosity. These soil parameters can be used to simulate the changes of stable water infiltration rate of  $L_1-S_5$  loess and paleosol in the Middle Late Pleistocene in Baoji.

**Keywords:** soil infiltration; loess and paleosol; paleo climatic change; middle and late Pleistocene series; Baoji Region

黄土高原第四纪黄土—古土壤序列是记录气候变化的重要陆相证据之一<sup>[1-2]</sup>,研究该区第四纪黄土—古土壤序列土壤入渗规律对于查明黄土地层中土壤水富集条件与规律及其水资源开发利用具有重要意义。

20世纪80年代以来,国内外学者对黄土与古土壤表层土壤的渗透性<sup>[3-5]</sup>、黄土孔隙网络特征与垂直节理<sup>[6-8]</sup>和黄土与气候变化的关系<sup>[9-11]</sup>进行了大量的研究,取得了古气候变化控制着黄土—古土壤序列的存在,决定着其质地和结构,进而影响着现代黄土水分的积累等重要认识。例如,Hou<sup>[3]</sup>,Chen<sup>[4]</sup>等认为,黄土高原地区的黄土与古土壤存在着渗透性差异;Shao等<sup>[5]</sup>研究认为黄土层比古土壤层孔隙度高、渗透性好、储水空间大,容易形成含水层,而古土壤则容易形成隔水层。赵景波等<sup>[12]</sup>研究结果表明,陕西洛川、长武和西安等地第四纪黄土—古土壤序列土壤渗透性与第四纪气候变化关系密切;但是,目前关于第四纪黄土—古土壤序列土壤渗透性与水理性质之间的定量关系尚不清楚,准确评估黄土—古土壤序列土壤渗透性与水理性质之间的定量关系有助于揭示第四纪气候变化对黄土地下水富集规律的控制作用。

本文以黄土地层比较发育的陕西宝鸡周原为研究区,利用黄土高原地区通用的双环法,研究宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土和古土壤的入渗特征,探讨土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量等土壤属性对土壤入渗特性的影响,揭示宝鸡中晚更新统  $L_1-S_5$  层黄土与古土壤的入渗规律,该研究成果有助于认识黄土高原地区地下水富集和运移规律,可以为区域生态环境建设和农业发展提供参考借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验样点位于关中平原西部宝鸡周原凤朝村,地理坐标为  $107^{\circ}29'03''E$ ,  $34^{\circ}22'13''N$ ,海拔高度为 713 m,属中纬度暖温带大陆性季风气候,冬冷夏热,春暖秋凉,四季分明。年平均气温  $13^{\circ}C$  左右,年平均降水量 700 mm 左右,4—10 月份降水量占全年降水总量的 90%,5—9 月为多雨期, $L_1-S_5$  层黄土和古土壤比较发育。

### 1.2 试验方法

本研究根据黄土高原地区降水比较集中的特点,采用双环法<sup>[13]</sup>进行土壤入渗试验。双环的内外直径分别为 20 cm 和 35 cm,高度均为 18.5 cm<sup>[13]</sup>。当进行黄土剖面土壤入渗试验时,首先挖出一个直径约为 1 m 的近圆形平坦地面,然后将双环放置在该平坦地面上,将双环下端埋入地下土层深度 5 cm 处,为防止加水时冲击底面土层影响入渗试验结果,在双环内底层铺上直径约 1 cm、厚度 3—5 cm 的细小砾石。入渗试验开始时,向双环内同时加水至 5 cm 高度,并标注记号,作为以后每次试验加水的标准刻度,然后分别记录每 5, 10, 20 min 入渗时加入的水量,试验过程中始终保持水面在标准刻度上,为保证入渗试验结果的精度,内环采用马氏瓶供水<sup>[14]</sup>,并在每个黄土剖面土壤入渗试验过程中记录水温。当土壤入渗率基本达到稳定时即停止试验,将达到稳定后的 3 组相近数据的平均值作为本次试验的土壤稳定入渗率,每个层位的土壤入渗试验重复测定 3~4 次。

土壤入渗速率计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$f_{10} = 10v/st(0.7 + 0.03T) \quad (1)$$

式中:  $f_{10}$  为 10℃ 标准水温所对应的土壤入渗速率 (mm/min);  $v$  为用马氏瓶注入内环中的水量 (ml);  $s$  为内环面积 (cm<sup>2</sup>);  $t$  为加入  $v$  ml 水时入渗所需的时间 (min);  $T$  为试验时记录的水温 (℃)。

分别采用下列 3 种公式<sup>[16]</sup>进行参数模拟。

考斯加可夫公式:

$$f(t) = at^{-b} \quad (2)$$

霍顿公式:

$$f(t) = f_0 + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

通用经验公式:

$$f(t) = a_1 + b_1 t^{-n} \quad (4)$$

式中:  $f(t)$ ,  $f_0$ ,  $f_c$ ,  $t$  分别为入渗率、初始入渗率、稳定入渗率和入渗时间;  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $n$  分别为经验参数。

宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土和古土壤中的土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度和土壤饱和含水量均采用环刀法<sup>[17]</sup>测定, 每次测定 3 个重复。土壤初始含水量用烘干法<sup>[17]</sup>测定, 每次测定 5 个重复。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土与古土壤入渗试验结果

宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土与古土壤入渗率具有明显的层位变化特征(图 1)。其中, 黄土层(L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub> 和 L<sub>5</sub>)土壤的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的变化范围分别为 5.41~7.1, 2.37~3.68, 1.95~2.85 mm/min, 平均值分别为 5.90, 3.15, 2.38 mm/min; 古土壤层(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>)土壤的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的变化范围分别为 3.66~6.31, 2.12~2.37, 1.29~1.95 mm/min, 平均值分别为 4.46, 2.23, 1.55 mm/min。黄土层和古土壤层稳定入渗率出现的顺序分别依次为 L<sub>1</sub>>L<sub>2</sub>>L<sub>5</sub>>L<sub>3</sub>>L<sub>4</sub> 层和 S<sub>3</sub>>S<sub>5</sub>>S<sub>2</sub>>S<sub>4</sub>>S<sub>1</sub> 层, 黄土层的平均稳定入渗率(2.38 mm/min)大于古土壤层的平均稳定入渗率(1.55 mm/min), 相邻层位的黄土和古土壤中, 位于上部黄土的渗透系数要大于下部古土壤的渗透系数。另外需要说明的是, L<sub>4</sub> 和 S<sub>4</sub> 层的土壤稳定入渗率和渗透系数相对较小, 后面层位的土壤稳定入渗率又呈增加趋势。S<sub>4</sub> 层的稳定入渗速率和渗透系数相对较小可能与 S<sub>4</sub> 层底部的结核层有关。

### 2.2 入渗试验结果的拟合

宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土和古土壤入渗试验结果分别采用考斯加可夫、霍顿和通用经验公式进行拟合<sup>[17]</sup>。在考斯加可夫公式中, 拟合参数  $a$  值的

大小一般与不同层位黄土的土壤容重和土壤初始含水量有关;  $b$  值一般反映了土壤入渗率递减的快慢程度,  $b$  值越大, 土壤入渗率随时间减小的越快; 反之, 土壤入渗率随时间减小的越慢<sup>[18]</sup>。宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土和古土壤入渗试验曲线采用考斯加可夫公式拟合时,  $a$  值的变化范围为 6.024~17.285;  $b$  值变化范围为 0.273~0.648, 由图 1 和表 1 可以看出,  $b$  值越大, 土壤入渗率随时间减小的越快; 反之, 土壤入渗率随时间减小的越慢。因此, 在宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土剖面中, S<sub>2</sub> 层的土壤入渗率递减速度最快, L<sub>4</sub> 层的土壤入渗率递减较慢。利用霍顿公式拟合时,  $f_0 - f_c$  的变化范围为 2.02~4.73, S<sub>2</sub> 层的初始入渗率和稳定入渗率相差最大, S<sub>1</sub> 层的初始入渗率和稳定入渗率相差最小。通用经验公式中  $a_1$  的值相当于稳定入渗率的值, 表明 L<sub>5</sub> 层的土壤稳定入渗率较大。

由图 2 可以明显看出, 宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土与古土壤不同阶段的入渗量总体上呈减小趋势, 并存在明显差异。具体来讲, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>, L<sub>5</sub> 层黄土稳定入渗阶段的入渗量较大, 其值分别为 1 865.16, 1 601.4, 2 637.6, 1 196.34, 3 014.4 ml, 5 个层位稳定阶段入渗量的平均值为 2 062.98 ml。S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub> 层古土壤稳定入渗阶段的入渗量较小, 其值分别为 753.6, 1 318.8, 1 224.6, 781.86, 1 092.72 ml, 5 个层位稳定阶段入渗量的平均值为 1 034.32 ml。由此可见, 宝鸡中晚更新统黄土层稳定入渗阶段的平均入渗量(2 062.98 ml)大于古土壤层稳定入渗阶段的平均入渗量(1 034.32 ml), 相邻层位的黄土和古土壤中, 位于上部黄土层不同阶段的入渗量要大于下部古土壤层不同阶段的入渗量。另外需要说明的是, L<sub>4</sub> 和 S<sub>4</sub> 层不同阶段的入渗量相对较小, 后面层位不同阶段的入渗量又呈增加趋势。S<sub>4</sub> 层不同阶段的入渗量相对较小可能与 S<sub>4</sub> 层底部的结核层有关。这些不同层位入渗量的差异可能与每个层位的土壤容重、土壤总孔隙度和土壤初始含水量等土壤属性的不同有关(表 2)。

### 2.3 土壤稳定入渗率与土壤参数的相关性

Pearson 相关分析表明, 宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土剖面的土壤稳定入渗率与土壤容重和土壤初始含水量呈显著负相关关系, 与土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度和土壤饱和含水量呈显著正相关关系(表 3), 说明土壤容重、土壤初始含水量、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度和土壤饱和含水量可能是影响宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土剖面土壤稳定入渗率变化的重要因素。

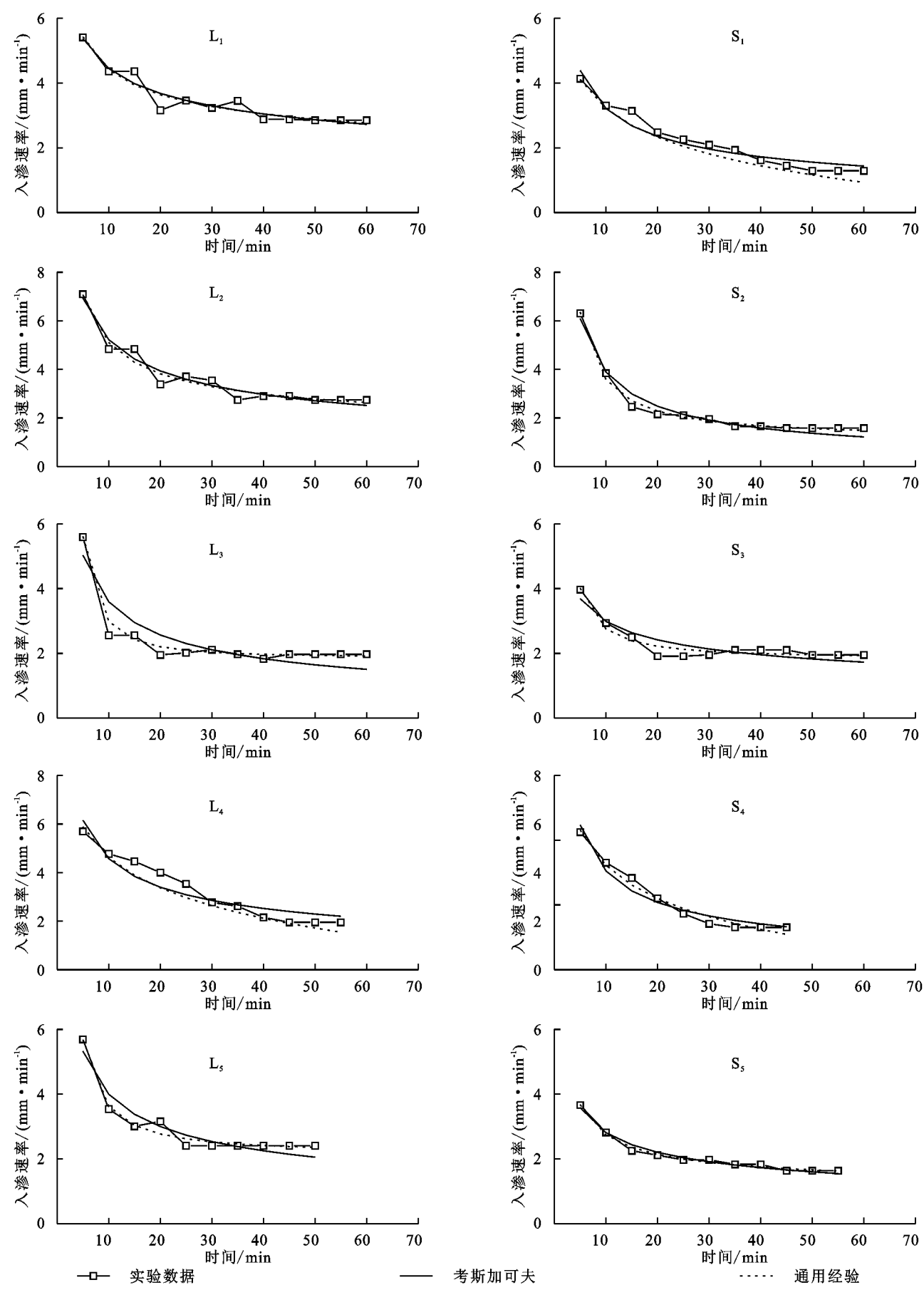


图 1 宝鸡 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层土壤入渗率与两种经验方程的拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of soil infiltration rate and two empirical equations in Baoji L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> layer



表 1 3 种入渗经验公式拟合参数回归分析结果

层位	考斯加可夫公式			霍顿公式				通用经验公式			
	$a$	$b$	$r$	$f_c$	$f_0-f_c$	$k$	$r$	$a_1$	$b_1$	$n$	$r$
L <sub>1</sub>	8.339	0.273	0.923	2.85	2.56	5.961	0.73	1.13	8.028	0.388	0.925
S <sub>1</sub>	9.054	0.45	0.943	1.29	2.84	5.562	0.90	-139.615	145.822	0.009	0.986
L <sub>2</sub>	13.361	0.408	0.951	2.74	4.35	6.159	0.69	1.397	15.206	0.613	0.957
S <sub>2</sub>	17.285	0.648	0.966	1.57	4.73	6.601	0.56	1.157	30.794	1.105	0.991
L <sub>3</sub>	10.975	0.485	0.850	1.97	3.62	7.236	0.36	1.873	62.501	1.750	0.993
S <sub>3</sub>	6.024	0.305	0.834	1.95	2.02	6.578	0.47	1.83	16.21	1.246	0.941
L <sub>4</sub>	12.275	0.429	0.899	1.95	3.74	5.365	0.93	-358.379	367.208	0.005	0.962
S <sub>4</sub>	10.88	0.553	0.954	1.31	2.94	5.46	0.86	-12.337	19.498	0.098	0.979
L <sub>5</sub>	10.364	0.414	0.912	2.41	3.29	6.418	0.57	2.166	27.218	1.272	0.977
S <sub>5</sub>	6.287	0.350	0.980	1.63	2.03	5.841	0.73	1.062	7.313	0.640	0.990

注： $r$  为相关性程度。

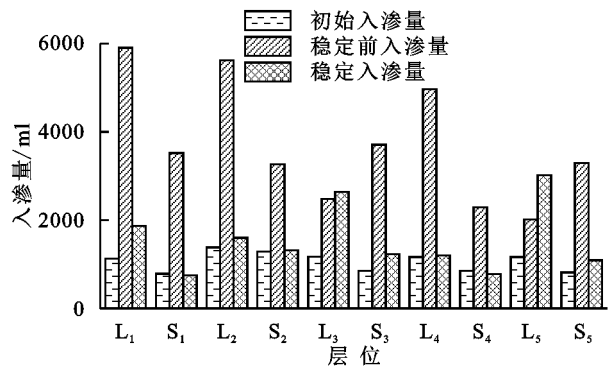


图 2 宝鸡 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 黄土剖面不同阶段入渗量对比

Fig. 2 Comparison of infiltration flux in Baoji L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> loess profile at different stages

2.4 土壤稳定入渗率变化模拟

土壤稳定入渗率是土壤水文循环过程的重要组

成部分,精确模拟土壤稳定入渗率有助于提高土壤蓄水量和土壤侵蚀的控制作用。本研究结合土壤稳定入渗率及其影响因素的函数关系方程形式,采用线性回归方法,借鉴王长燕等<sup>[13]</sup>研究成果,利用中晚更新统 L<sub>4</sub>—S<sub>5</sub> 各层的土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量能够较好地模拟土壤稳定入渗率。在该模拟方程中,土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量等自变量可以解释土壤稳定入渗率 88% 的变量(图 3 和表 4),说明土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量是影响土壤稳定入渗率变化的主要因素,该结果与王长燕等<sup>[13]</sup>在黄土丘陵区的研究结果相似。

表 2 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土与古土壤土壤理化性质

层位	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤毛管 孔隙度/%	毛管最大 持水量/%	土壤总 孔隙度/%	土壤饱和 含水量/%	土壤初始 含水量/%
L <sub>1</sub>	1.38±0.03	42.33±0.72	30.73±0.60	42.63±0.62	30.95±0.70	17.62±0.01
S <sub>1</sub>	1.77±0.01	35.16±0.46	19.91±0.09	35.30±0.51	19.99±0.10	20.27±0.08
L <sub>2</sub>	1.44±0.01	41.39±0.88	28.77±0.63	42.16±0.81	29.30±0.55	19.24±0.78
S <sub>2</sub>	1.70±0.01	36.52±0.40	21.55±0.27	37.12±0.18	21.90±0.16	20.92±0.05
L <sub>3</sub>	1.54±0.01	39.12±0.05	25.39±0.08	39.82±0.03	25.85±0.05	19.85±0.07
S <sub>3</sub>	1.59±0.03	37.83±1.14	23.78±0.83	38.06±0.54	23.92±0.45	19.52±0.40
L <sub>4</sub>	1.59±0.02	37.18±0.13	23.39±0.24	37.23±0.04	23.42±0.15	20.11±0.03
S <sub>4</sub>	1.68±0.02	37.72±0.09	22.49±0.03	38.66±0.07	23.05±0.06	20.87±0.51
L <sub>5</sub>	1.50±0.01	42.28±0.89	28.21±0.26	42.33±0.63	28.25±0.17	19.35±0.33
S <sub>5</sub>	1.74±0.02	34.78±0.71	19.94±0.46	34.93±0.62	20.03±0.42	21.52±0.01

表 3 土壤稳定入渗率与土壤参数的相关性

项目	土壤 容重	土壤毛管 孔隙度	毛管最大 持水量	土壤总 孔隙度	土壤饱和 含水量	土壤初始 含水量
土壤稳定入渗率	-0.86**	0.72**	0.85**	0.67**	0.85**	-0.67**

注：\*\*表示  $p<0.01$ 。

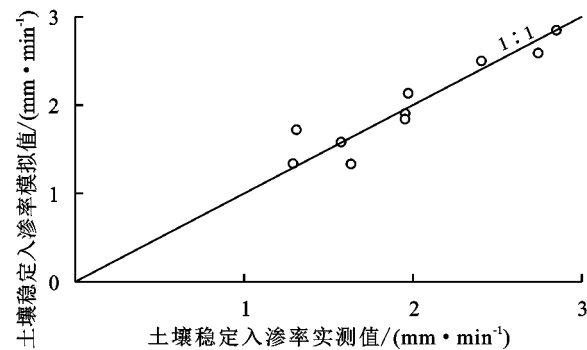


图 3 土壤稳定入渗率模拟值与实测值的关系

Fig. 3 Relationship between simulated and measured values of soil stable infiltration rate

3 讨论

3.1 中晚更新统黄土和古土壤入渗规律的区域比较

宝鸡和洛川地区中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土与古

土壤稳定入渗率总体呈减小趋势,并存在明显的区域差异(图 4)。本研究中,宝鸡地区中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土和古土壤的平均稳定入渗率(2.38,1.55 mm/min)分别是赵景波等<sup>[12]</sup>报道的洛川 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土和古土壤平均稳定入渗率(0.68,0.51 mm/min)的 3.5,3.04 倍(图 4),这可能是由于测量方法和气候条件等不同所致。例如,本研究中所使用的双环内外直径分别为 20,35 cm,与洛川等研究中所使用的双环直径分别为 30 cm 和 60 cm 有一定的差别。任宗萍等<sup>[19]</sup>在黄土丘陵区的研究结果表明,双环直径的大小对土壤入渗速率具有显著的影响。此外,本研究试验地的气候类型为暖温带季风性气候,赵景波等<sup>[12]</sup>研究中试验地的气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候,两地气候条件的差异会导致土壤成壤作用强弱的不同,从而造成土壤水理性质的差异,进而造成土壤渗透性的不同。

表 4 土壤稳定入渗率模拟方程参数值

Table 4 Parameter values of the simulation equation of soil stable infiltration rate

层位	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	NSE
L <sub>1</sub> —S <sub>5</sub>	−0.70	0.01	0.08	0.02	0.01	−0.01	0.88	0.88

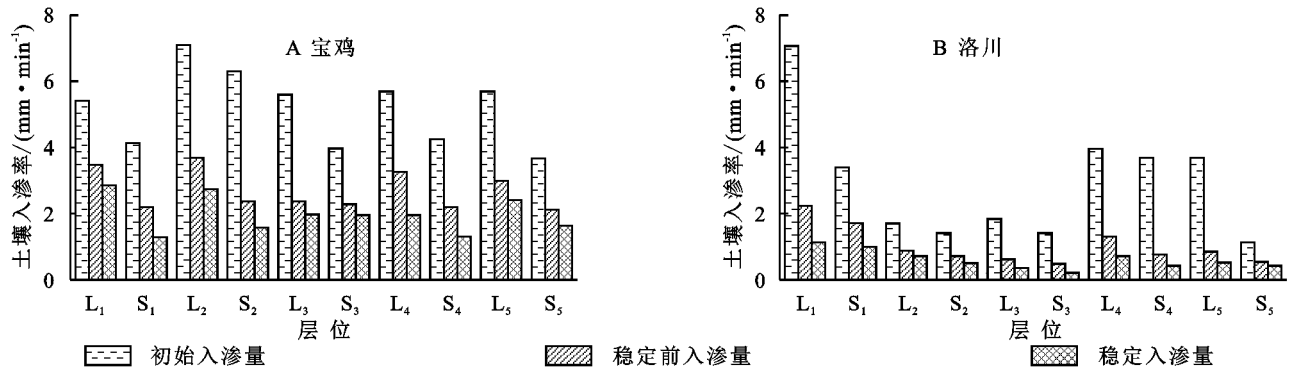


图 4 宝鸡和洛川 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 层黄土剖面土壤入渗率对比

Fig. 4 Comparison of soil infiltration rates in L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> layers of loess profiles in Baoji and Luochuan

3.2 气候变化对黄土和古土壤入渗率的影响

黄土层形成时气候一般偏冷干,降水较少,风化成壤作用相对较弱,在这种气候条件下,土壤的黏土化作用较弱,粉粒间缺乏黏土(化学)胶结物,土粒间微孔含水空间发育<sup>[12]</sup>,多形成含水层,土壤容重相对较小,土壤渗透系数则相对较大,土壤稳定入渗率的值也相对较大。古土壤层形成时气候一般比较湿热,降水较多,风化成壤作用相对较强,棱柱状结构较为发育,土壤中黏化作用较强,黏粒含量较高,孔隙度较小,土壤容重相对较大,从而导致隔水性较强,多形成隔水层<sup>[12]</sup>,土壤渗透系数较小,土壤稳定入渗率的值相对较小。因此,黄土层的渗透系数大于古土壤层的渗透系数。由此可见,气候变化可以通过影响土壤的风化成壤作用来改变土壤的理化性质,进而会导致黄土和古土壤层渗透系数大小的不同,其影响的程度和

大小往往与土壤风化成壤作用的强弱有关<sup>[12]</sup>,这与本研究中黄土层的平均稳定入渗率大于古土壤层的平均稳定入渗率的研究结果较为一致。

3.3 土层物理性质与黄土和古土壤入渗性能的关系

土壤容重是衡量土壤生产力和土壤质量的重要指标之一,它会影响土壤的入渗性能、持水能力和抗侵蚀能力。当土壤容重较大时,土壤往往比较紧实,土壤孔隙度较小,土壤中的水流下渗缓慢,土壤稳定入渗率相对较小;反之,当土壤比较松散或有裂隙发育时,土壤容重较小,水流沿着松散土壤或裂隙以较快速度下渗,从而导致较大的土壤稳定入渗率<sup>[13]</sup>。本研究中,Pearson 相关分析表明,宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub> 各层土壤稳定入渗率与土壤容重均呈显著负相关关系(表 2),该研究结果与宋爱云等<sup>[20]</sup>的研究结果较为一致。

水分在土壤中的运移也受到土壤孔隙性和毛管孔隙度的影响,土壤总孔隙度是评价土壤孔隙性的重要指标之一<sup>[13]</sup>。土壤中孔隙大小和形状的差异会导致对土壤中水分保持和运移影响的不同,从而导致土壤稳定入渗率大小的不同<sup>[13]</sup>。黄土层中的孔隙主要有粒间孔隙、大孔隙(植物根孔和动物虫孔)和宏观垂向裂隙等<sup>[12]</sup>。另外,黄土层中还有长度一般为2~4 m,宽度多为2~3 cm,间距多为2~3 m的宏观垂向大裂隙的发育<sup>[12]</sup>。因此,黄土层的孔隙度往往较大;古土壤形成时,往往会导致土壤中黏粒含量的增加和胶结作用的增强,从而造成土壤中孔隙度相对较小。本研究中,Pearson 相关分析表明,宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层中土壤总孔隙度与土壤稳定入渗率也呈显著正相关关系(表4),该研究结果与王鹏程等<sup>[21]</sup>的研究结果相同。另外,Pearson 相关分析还表明,宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层中土壤稳定入渗率与土壤毛管最大持水量和土壤饱和含水量呈显著正相关关系,与土壤初始含水量呈显著负相关关系(表3),说明土壤毛管最大持水量、土壤饱和含水量和土壤初始含水量等也是影响土壤稳定入渗率的重要因素,其影响机制有待于进一步查明。

### 3.4 宝鸡中晚更新统黄土和古土壤入渗模型模拟评价

从3种方程的拟合 $r$ 值来看,L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层的入渗试验曲线与考斯加可夫公式和通用经验公式拟合的 $r$ 值在0.83~0.993, $r$ 值相对较高,说明拟合结果较好;S<sub>2</sub>,L<sub>3</sub>,S<sub>3</sub>和L<sub>5</sub>层利用霍顿公式进行拟合时, $r$ 值在0.36~0.57, $r$ 值较低,说明该拟合方程不能很好地拟合这些层位的土壤入渗规律。由此可见,利用考斯加可夫公式和通用经验公式拟合的各层土壤入渗试验曲线都较好,适用于描述宝鸡中晚更新统50万a以来发育的L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层黄土和古土壤的入渗规律。

本研究利用线性回归方法建立的土壤稳定入渗率与土壤容重、土壤毛管孔隙度和毛管最大持水量等土壤属性的拟合方程中, $R^2$ 和NSE的值均为88%,说明可以利用该方程较好地拟合它们之间的关系,但该方程由于只考虑了土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量对土壤稳定入渗率变化的影响,未考虑其他土壤属性的影响。因此,具有一定的局限性和偏差。

## 4 结论

(1) 宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层黄土的平均稳定

入渗率大于古土壤的平均稳定入渗率,相邻层位的黄土和古土壤中,上部黄土的渗透系数要大于下部古土壤的渗透系数。黄土层孔隙度和渗透系数较大,有利于形成含水层。古土壤层孔隙度和渗透系数较小,有利于形成隔水层。

(2) 土壤容重、土壤初始含水量、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度和土壤饱和含水量等土壤属性是影响宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层黄土和古土壤稳定入渗率变化的重要因素。

(3) 利用土壤容重、土壤毛管孔隙度、毛管最大持水量、土壤总孔隙度、土壤饱和含水量和土壤初始含水量等参数可以很好地模拟宝鸡中晚更新统 L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层黄土和古土壤的土壤稳定入渗率,该模拟方程可以为黄土高原地区水资源的开发和利用提供参考借鉴,但具有一定的局限性和偏差。

(4) 考斯加可夫公式和通用经验公式适用于描述宝鸡中晚更新统50万a以来发育的L<sub>1</sub>—S<sub>5</sub>层黄土和古土壤的入渗规律,该结果可为研究黄土高原地区土壤水循环过程和农田灌溉提供参考借鉴。

### 参考文献:

- [1] Bird M I, Haig J, Hadeen X, et al. Stable isotope proxy records in tropical terrestrial environments[J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 538:109445.
- [2] Sun Y B, Yan Y, Nie J S, et al. Source-to-sink fluctuations of Asian aeolian deposits since the Late Oligocene[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 200:102963.
- [3] Hou K, Qian H, Zhang Y T, et al. Seepage mechanisms and permeability differences between loess and paleosols in the critical zone of the Loess Plateau[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(10): 2044-2059.
- [4] Chen Y, Qian H, Hou K, et al. Permeability and paleo-environmental implications of loess-paleosol sequence from Jingyang Loess Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80:1-16.
- [5] Shao T J, Wang R J, Xu Z P, et al. Permeability and groundwater enrichment characteristics of the loess-paleosol sequence in the southern Chinese Loess Plateau[J]. *Water*, 2020, 12(3).DOI:10.3390/w12030870.
- [6] Wei T T, Fan W, Yuan W W, et al. Three-dimensional pore network characterization of loess and paleosol stratigraphy from South Jingyang Plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(11):123-133.
- [7] Feng L, Lin H, Zhang M S, et al. Development and evolu-

- tion of Loess vertical joints on the Chinese Loess Plateau at different spatiotemporal scales[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105372.
- [8] Schlüter S, Albrecht L, Schwärzel K, et al. Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity-Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114082.
- [9] Perić Z, Adolphi E L, Stevens T, et al. Quartz OSL dating of late quaternary Chinese and Serbian loess: A cross Eurasian comparison of dust mass accumulation rates[J]. *Quaternary International*, 2019, 502: 30-44.
- [10] Liu X X, Sun Y B, Vandenberghe J, et al. Palaeoenvironmental implication of grain-size compositions of terrace deposits on the western Chinese Loess Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2018, 32: 202-209.
- [11] Li Y Y, Yang S L, Xiao J L, et al. Hydrogen isotope ratios of leaf wax n-alkanes in loess and floodplain deposits in Northern China since the last glacial maximum and their paleoclimatic significance[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 509: 91-97.
- [12] 赵景波, 王长燕, 刘护军, 等. 陕西洛川黄土剖面上部土层水分入渗规律与含水条件研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(1): 124-129, 134.
- Zhao J B, Wang C Y, Liu H J, et al. A study of water infiltration and water-bearing condition of the  $L_1-S_4$  layers in Luochuan, Shaanxi[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(1): 124-129, 134.
- [13] 王长燕, 郁耀闯. 黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 107-113.
- Wang C Y, Yu Y C. Variation of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in loess hilly region[J]. *Agricultural Research the Arid Areas*, 2017, 35(3): 107-113.
- [14] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 733-739.
- Yang Z Q, Qin F C, Li M Y, et al. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in feldspathic sandstone region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 733-739.
- [15] 孙福海, 肖波, 张鑫鑫, 等. 黄土高原生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响及其模型模拟[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2020, 48(10): 82-91.
- Sun F H, Xiao B, Zhang X X, et al. Effects of bio-crust covering on soil water infiltration characteristics on the Loess Plateau and its simulation[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2020, 48(10): 82-91.
- [16] Mazloom H, Foadmand H. Evaluation and determination of the coefficients of infiltration models in Marvdasht region, Fars Province[J]. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2013, 1(8): 822-829.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. *Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [18] 郑凯利, 邓东周. 若尔盖湿地土壤入渗性能及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 179-184, 191.
- Zheng K L, Deng D Z. Soil infiltration performance and influencing factors in Zoige Wetland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 179-184, 191.
- [19] 任宗萍, 张光辉, 王兵, 等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 94-97.
- Ren Z P, Zhang G H, Wang B, et al. Effects of double-ring diameter on soil infiltration rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 94-97.
- [20] 宋爱云, 董林水, 刘世荣, 等. 不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 41-45.
- Song A Y, Dong L S, Liu S R, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of different sub-alpine meadow community types[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(3): 41-45.
- [21] 王鹏程, 肖文发, 张守攻, 等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 51-55.
- Wang P C, Xiao W F, Zhang S G, et al. Study on soil permeability of main Forest vegetation types in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 51-55.