

石漠化区退耕驱动下露石岩—土界面土壤渗透特性变化

刘婷婷^{1,2}，戴全厚^{1,2}，彭旭东^{1,2}，岑龙沛^{1,2}，许胜兵^{1,2}

(1.贵州大学林学院,贵阳 550025;2.贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心,贵阳 550025)

摘要：为揭示退耕对石漠化区露石岩—土界面土壤渗透特性的影响,以典型石漠化坡耕地为对照,选择休闲地、退耕灌草和果园为研究对象,采用环刀法研究了平直、外凸和内凹型露石岩—土界面土壤渗透特性。结果表明:(1)不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程及特征差异较大,从初始入渗率到稳定入渗率衰减幅度在 0.350~55.756 mm/min,而不同岩—土界面形状间土壤入渗速率差异较大;(2)不同退耕类型岩—土界面土壤入渗速率的主要影响因素为毛管孔隙度和非毛管孔隙度,初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均与毛管孔隙度呈极显著负相关($p<0.01$),而初始入渗率与非毛管孔隙度呈显著正相关($p<0.05$);(3)与 Kostiakov 模型和 Philip 模型相比,Horton 模型对不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程拟合适用性最好,可以更好地模拟和预测不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程和入渗能力;(4)主成分分析评价不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力大小为坡耕地(0.99)>休闲地(0.16)>退耕灌草地(-0.43)>退耕果园(-0.72)。退耕明显降低石漠化区露石岩—土界面土壤入渗能力,这种降低在外凸型岩—土界面最为显著。研究结果可为深入认识退耕对石漠化区岩—土界面水分渗漏提供科学依据。

关键词：退耕还林；岩—土界面；入渗特征；入渗模型；石漠化区

中图分类号：S152.7⁺2 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)06-0088-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.012

Variation of Soil Infiltration Characteristics at Rock-Soil Interface
Driven by Returning Farmland in Rocky Desertification Area

LIU Tingting^{1,2}, DAI Quanhou^{1,2}, PENG Xudong^{1,2}, CEN Longpei^{1,2}, XU Shengbing^{1,2}

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025;

2.Institute of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to reveal the effect of returning farmland on the soil infiltration characteristics of the outcrop rock-soil interface in the rocky desertification area, the arable land was taken as the control, and the fallow field, farmland return to shrubs grassland and orchard were selected as the research objects, and the soil infiltration characteristics of rock-soil interface with different shapes of straight, convex and concave were studied through the ring knife method. The results showed that: (1) The soil infiltration process and characteristics at the rock-soil interface of different types of returning farmland varied greatly. From the initial infiltration rate to the stable infiltration rate, the attenuation range was between 0.350 mm/min and 55.756 mm/min, and the soil infiltration rate varied greatly among different rock-soil interface shapes. (2) The main influencing factors of soil infiltration rate at rock-soil interface of different types of returning farmland were capillary porosity and non-capillary porosity. The initial infiltration rate, average infiltration rate and stable infiltration rate all had extremely significant negative correlation with capillary porosity ($p<0.01$). The initial infiltration rate was significantly positively correlated with non-capillary porosity ($p<0.05$). (3) Compared with Kostiakov model and Philip model, Horton model had the best applicability for fitting the soil infiltration process at the rock-soil interface of different types of returning farmland, and it could better simulate the soil infiltration process and predict the soil infiltration capacity. (4) According to the principal component analysis, soil infiltration capacity at the rock-soil interface followed the order of

收稿日期:2022-04-10
资助项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y176);国家自然科学基金项目(42007067);贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2021]082);贵州省高层次创新型千层次人才项目;贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007);贵州大学培育项目(贵大培育[2019]36 号)
第一作者:刘婷婷(1994—),女,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:yuj157@126.com
通信作者:彭旭东(1989—),男,贵州毕节人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:bjpxd@126.com

arable land (0.99) > fallow field (0.16) > returning farmland to shrubs and grassland (−0.43) > returning farmland to orchard (−0.72). The returning farmland significantly reduced the soil infiltration capacity of the outcrop rock-soil interface in the rocky desertification area, especially at the convex rock-soil interface. The research results were expected to provide a scientific basis for future understanding of the water leakage at the rock-soil interface in rocky desertification areas after returning farmland.

Keywords: returning farmland; rock-soil interface; infiltration characteristics; infiltration model; rocky desertification area

石漠化是由于喀斯特区碳酸盐岩低成土速率和高渗透性,加之农耕活动、放牧等造成水土流失、碳酸盐岩逐渐裸露地表而形成的地表景观^[1-2]。为应对喀斯特区水土流失、土地石漠化等生态环境问题,我国自 2002 年全面启动退耕还林(草)生态恢复工程^[3]。有研究^[4-5]发现,退耕能显著改善退耕区土壤质量,且随着植被恢复,植被根区土壤容易形成高度多孔结构,土壤渗透性显著增加^[6]。植被恢复主要通过增加凋落物输入,根系穿插增加土壤孔隙度,提高水力传导率^[7],改善土壤渗透性。土壤水分入渗是陆地水文循环中的一个重要过程,影响地表径流、地下水补给、土壤侵蚀以及植被的水分收支^[8-9]。岩—土界面作为出露碳酸盐岩与土壤之间硬软相接的界面,被认为是石漠化区水分漏失的重要路径^[10],岩—土界面土壤渗透性近年来成为石漠化区水土保持研究的热点。石漠化区露岩岩—土界面能以优先流形式提高岩—土界面土壤渗透能力,雨水迅速通过岩—土界面下渗,减少地表径流形成^[11]。有研究^[12]发现,裸露地表的碳酸盐岩能接收大量的降水,并以岩面流的形式补给露石附近的土壤,这在一定程度上改善了土壤物

理性质^[11],如土壤含水量和孔隙度等。然而,不同形状露石岩—土界面土壤渗透特性可能不同,而退耕驱动下其土壤渗透特性将发生何种变化尚不清楚。本文在典型石漠化县—贵州长顺选择休闲地、退耕灌草和果园等样地为研究对象,以坡耕地为对照,采用环刀法分别研究了平直、外凸和内凹等不同形状露石岩—土界面土壤渗透特性,以期深入认识退耕驱动下不同形状露石岩—土界面土壤渗透特性差异,揭示退耕对石漠化区露石岩—土界面土壤入渗能力的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省长顺县干河村,试验点位于约东经 106°29′59″,北纬 26°1′30″,海拔 990 ~ 1 005 m,属于亚热带季风气候,年均降水量 1 100 ~ 1 300 mm。该区为典型的喀斯特地貌,主要岩石类型为石灰岩且裸露率高,土壤类型主要为黄壤和石灰土。裸露石灰岩差异性溶蚀明显,形成形状各异的岩面特征,如裂缝、溶槽溶沟等。在研究区选择休闲地、退耕灌草地、退耕果园作为试验样地,以坡耕地为参照,样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

样地	退耕年限/a	地理位置	坡位	海拔/ m	岩石 裸露率/%	植被 覆盖度/%	植被状况
休闲地	1	26°01′30″N,106°29′59″E	中坡	1003	35	65	花椒、小蓬草、鬼针草、清明菜、苜蓿菜、马兰
退耕灌草	5	26°01′30″N,106°29′59″E	中坡	1005	45	60	朴树、花椒、风龙、秋葵、鬼针草、马兰、一年蓬、矛莓、巨苣菜、打碗花、小蓬草、芒、苕草
退耕果园	5	26°01′25″N,106°30′02″E	下坡	990	40	65	桃树、小蓬草、鬼针草、黄花捻、苕草、马兰、一年蓬、苔藓、苦苣菜、秋葵
坡耕地	—	26°01′31″N,106°29′58″E	中坡	1002	30	<10	玉米、花椒、小蓬草、茅草、薹、醉浆草、鬼针草

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 试验于 2021 年 5 月进行,在不同退耕类型样地内,选择不同形状露石岩—土界面,包括平直型岩面、外凸型岩面、内凹型岩面 3 种^[13]。采用 100 cm³环刀在各形状岩—土界面处分别采集 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层原状土用于测定土壤入渗率、孔隙度、土壤容重等,每个土壤样品 3 个重复,最后取平均值;并采集混合样(约 2 kg)用于测定土壤颗粒组成。

1.2.2 测定指标与方法 将上述环刀浸入与环刀口平齐的水中浸泡 12 h 以测定饱和含水量,后取出放置在装有干沙的平底盘中沥水 2 h 测定毛管持水量,沥水 3 昼夜测定土壤田间持水量。采用环刀法^[14]测定土壤入渗率,将环刀平放于固定在水平架子的漏斗上,在漏斗下方放置烧杯收集入渗量,试验中用马氏瓶定水头供水,待漏斗中滴下第 1 滴水开始计时,前 30 min 内每 1 min 记录 1 次入渗量,之后每 2 min 记录 1 次入渗量,直至连续 5 次入渗量数值基本相等时

停止试验。初始入渗率为最初入渗时段内渗透量与入渗时间的比值,本文取前 3 min 入渗率计算初始入渗率;平均入渗率为达到稳渗时的入渗总量与达到稳渗时间的比值;稳定入渗率为单位时间内渗透量趋于同一渗透速率。土壤入渗率计算公式为:

$$V=10Q_n/S/T_n \quad (1)$$

式中: V 为入渗率(mm/min); Q_n 为第 n 次的入渗量(mm/min); S 为环刀内截面积(mm/min); T_n 为第 n 次测量的时间间隔(mm/min)。

1.2.3 数据处理 数据统计分析采用 SPSS、Origin 等软件完成。本研究采用主成分分析来评价不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力,对初始入渗率(X_1)、平均入渗率(X_2)、稳定入渗率(X_3)以及 70 min 渗透总量(X_4)进行主成分分析评价,从多个土壤入渗特征参数中提取少数的、互不相关的、独立的主因子,分析不同处理下岩—土界面土壤入渗能力大小。采用 Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型拟合岩—土界面土壤水分入渗过程:

(1)Kostiakov 模型:

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

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 和 b 为经验参数。

(2)Philip 模型:

$$f(t)=0.5St^{-0.5}+f_c \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); S 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); f_c 为稳定入渗率(mm/min)。

(3)Horton 模型:

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); f_0 为初始入渗率(mm/min); f_c 为稳定入渗率(mm/min); k 为经验参数。

2 结果与分析

2.1 不同退耕类型岩—土界面土壤水分入渗过程及特征

由图 1 可知,不同退耕类型岩—土界面土壤水分入渗过程衰减速度差异明显。入渗速率随时间增加呈降低趋势,不同退耕类型岩—土界面土壤入渗速率均在 70 min 达到稳定,入渗初期入渗速率衰减速度较快,后速度变慢直到稳定。坡耕地内凹型(图 1c)、休闲地平直型(图 1a)和退耕灌草外凸型(图 1b)岩—土界面 0—10 cm 土层土壤入渗速率衰减幅度最显著,衰减幅度分别为 55.756,52.756,51.13 mm/min;其次是坡耕地平直型(图 1a)岩—土界面 0—10,10—20 cm 土层(图 1d)和休闲地平直型 10—20 cm 土层(图 1d),分别为 36.004,31.253,35.504 mm/min。其他退耕类型岩—土界面土壤入渗趋势较平缓,以退耕灌草地平直型岩—土界面 10—20 cm 土层(图 1d)最

典型,衰减幅度仅 0.35 mm/min。坡耕地平直型(图 1d)、内凹型(图 1c)0—10 cm 土层土壤入渗速率在入渗开始 2 min 内显著增大,2 min 后逐渐降低,与土壤毛管孔隙特性有关。

由图 2 可知,不同退耕类型岩—土界面土壤入渗特征差异较大。坡耕地内凹型岩—土界面 0—10 cm 土层的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率最大,分别为 233.775,209.482,192.598 mm/min,入渗能力最好;退耕灌草平直型岩—土界面 10—20 cm 土层最小,分别为 0.167,0.209,0.217 mm/min,入渗能力最差。0—10 cm 土层中,内凹型岩—土界面土壤入渗特征表现为坡耕地>退耕灌草>退耕果园>休闲地;外凸型表现为退耕灌草>坡耕地>休闲地>退耕果园;平直型表现为休闲地、坡耕地>退耕灌草>退耕果园。休闲地不同形状岩—土界面 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层入渗特征差值变化小于 4 mm/min,土层间入渗能力差异最小;退耕果园 10—20 cm 土层入渗率显著大于 0—10 cm 土层,说明退耕果园底层土土壤入渗能力大于表层土,与土壤受践踏孔隙度降低有关。

2.2 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力影响因素分析

表 2 分析了不同退耕类型岩—土界面土壤初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率与土壤物理性质的 Pearson 相关性(样本量为 24)。由表 2 可知,不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力的主要影响因素为毛管孔隙度和非毛管孔隙度。入渗特征与土壤容重、土壤含水率、总孔隙度、砂粒和黏粒呈负相关,但均未达显著水平($p>0.05$);入渗特征与非毛管孔隙度和粉粒呈正相关,其中初始入渗率与非毛管孔隙度相关性显著($p<0.05$),初始入渗率随着非毛管孔隙度的增加而显著增大,其他因素均未达到显著水平($p>0.05$);入渗特征与毛管孔隙度呈极显著负相关($p<0.01$),结果反映岩—土界面土壤初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率随毛管孔隙度增多而极显著减小。

2.3 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗模型优化

本文采用 Philip 模型、Kostiakov 模型和 Horton 模型对不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程进行优化模拟,拟合结果见表 3。由表 3 可知,Horton 模型的拟合系数 R^2 极大值和均值均大于 Philip 模型和 Kostiakov 模型,拟合适用性大小为 Horton 模型>Kostiakov 模型>Philip 模型。因此 Horton 模型对岩—土界面土壤的入渗过程拟合适用性最好,可以更好地模拟和预测不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程和入渗能力,与朱列坤等^[15]在喀斯特区非岩—土界面的研究结果一致。

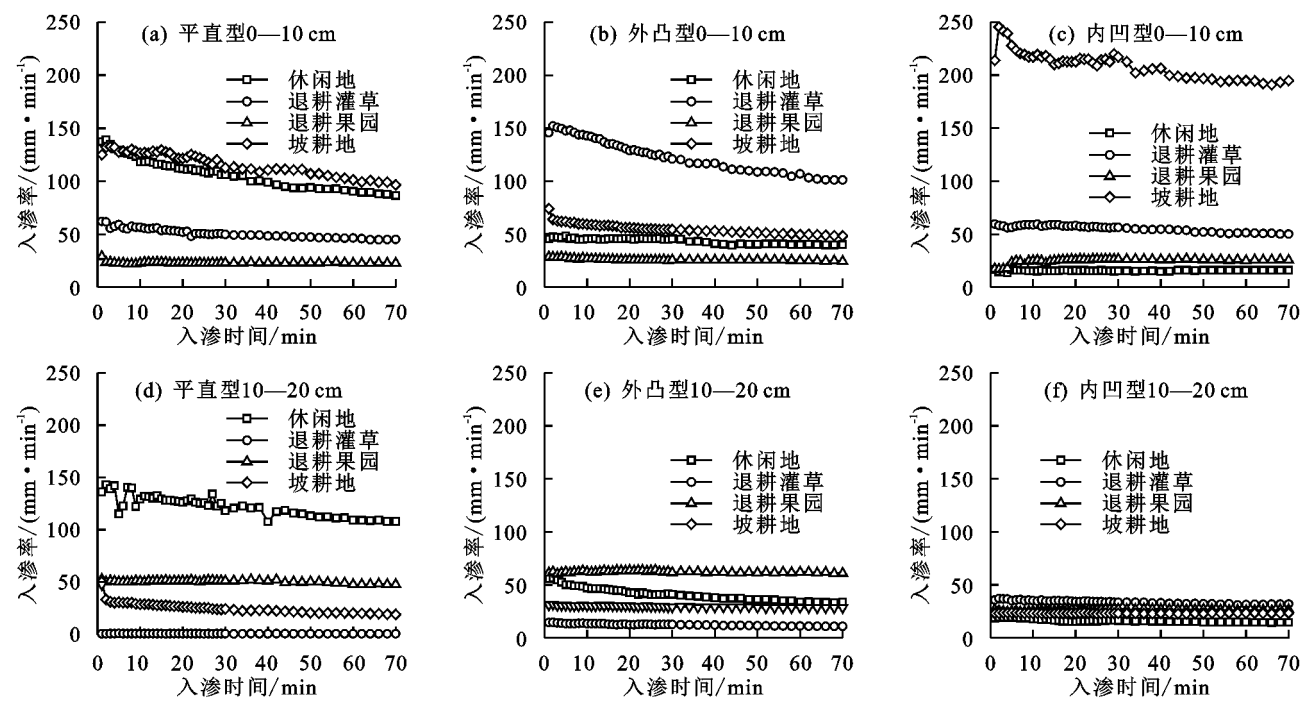


图 1 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程

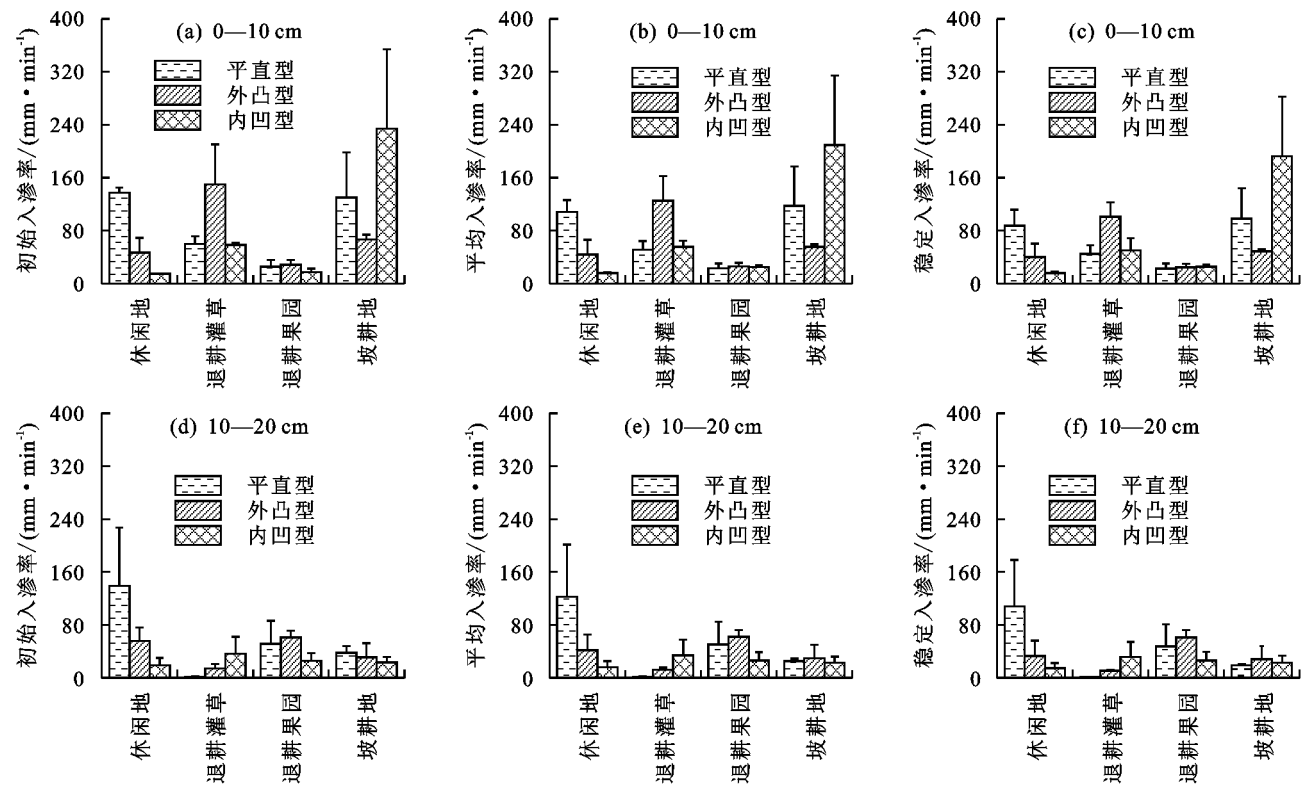


图 2 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗特征

测定指标		项目	土壤容重	土壤含水率	非毛管孔隙	毛管孔隙	总孔隙	砂粒	粉粒	黏粒
初始入渗率	相关系数		-0.288	-0.310	0.434 *	-0.576 **	-0.018	-0.051	0.086	-0.007
	<i>p</i>		0.172	0.141	0.034	0.003	0.934	0.815	0.689	0.975
平均入渗率	相关系数		-0.263	-0.307	0.394	-0.584 **	-0.056	-0.022	0.062	-0.038
	<i>p</i>		0.215	0.144	0.056	0.003	0.795	0.917	0.774	0.859
稳定入渗率	相关系数		-0.226	-0.314	0.338	-0.603 **	-0.117	0.002	0.041	-0.068
	<i>p</i>		0.288	0.135	0.106	0.002	0.587	0.992	0.849	0.754

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 3 回归模型分析

样地	形状	Philip 模型			Kostiakov 模型			Horton 模型			
		S	f_c	R^2	a	b	R^2	f_c	$f_0 - f_c$	k	R^2
休闲地	平	113.634	101.511	0.636	151.205	0.089	0.838	82.385	54.026	0.018	0.946
	凸	42.269	37.652	0.665	56.141	0.089	0.875	32.548	18.388	0.022	0.979
	凹	6.825	15.040	0.606	17.848	0.948	0.734	15.231	2.433	0.066	0.785
退耕灌草	平	23.194	22.908	0.713	32.857	0.080	0.891	22.072	8.449	0.035	0.945
	凸	77.559	59.185	0.591	93.882	0.103	0.825	46.560	37.626	0.020	0.992
	凹	17.523	42.488	0.426	50.497	0.040	0.682	-875.610	923.442	0	0.958
退耕果园	平	6.359	35.868	0.336	38.250	0.014	0.309	36.570	63.849	2.726	0.434
	凸	4.662	43.518	0.378	45.631	0.011	0.607	-224.020	268.940	0	0.809
	凹	-15.164	27.426	0.703	22.062	-0.048	0.622	26.344	-6.467	0.148	0.828
坡耕地	平	71.835	62.299	0.619	93.852	0.091	0.827	40.713	43.168	0.013	0.973
	凸	31.268	38.601	0.846	21.502	0.064	0.957	38.473	10.131	0.041	0.926
	凹	55.009	109.877	0.495	134.257	-0.046	0.716	100.695	26.685	0.020	0.807

注: a 、 b 、 k 为拟合参数; S 为入渗率; f_0 为初始入渗率; f_c 为稳定入渗率; R^2 为拟合系数。

2.4 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力评价

主成分分析提取 1 个主成分,特征值为 3.859,方差贡献率达到 96.472%,几乎解释整个总方差。初始入渗率(X_1)、稳定入渗率(X_2)、平均入渗率(X_3)以及 70 min 渗透总量(X_4)得分系数分别为 0.497, 0.507, 0.508, 0.488, 稳定入渗率最高。

通过主成分方程 $Y_1 = 0.497X_1 + 0.507X_2 + 0.508X_3 + 0.488X_4$, 计算其得分(图 3), 对不同退耕类型及岩—土界面形状土壤入渗能力进行评价。不同退

耕类型岩—土界面土壤入渗能力为坡耕地(0.99)>休闲地(0.16)>退耕灌草地(-0.43)>退耕果园(-0.72), 坡耕地岩—土界面土壤入渗能力最强(图 3a), 入渗能力是休闲地的 6 倍;不同形状岩—土界面土壤入渗能力为平直型(0.85)>内凹型(-0.30)>外凸型(-0.55), 平直型岩—土界面土壤入渗能力最强(图 3b), 但不同退耕类型岩—土界面形状间土壤入渗能力规律性不显著(图 3c、图 3d、图 3e、图 3f), 可能与岩—土界面汇水面积和岩石倾角等有关。

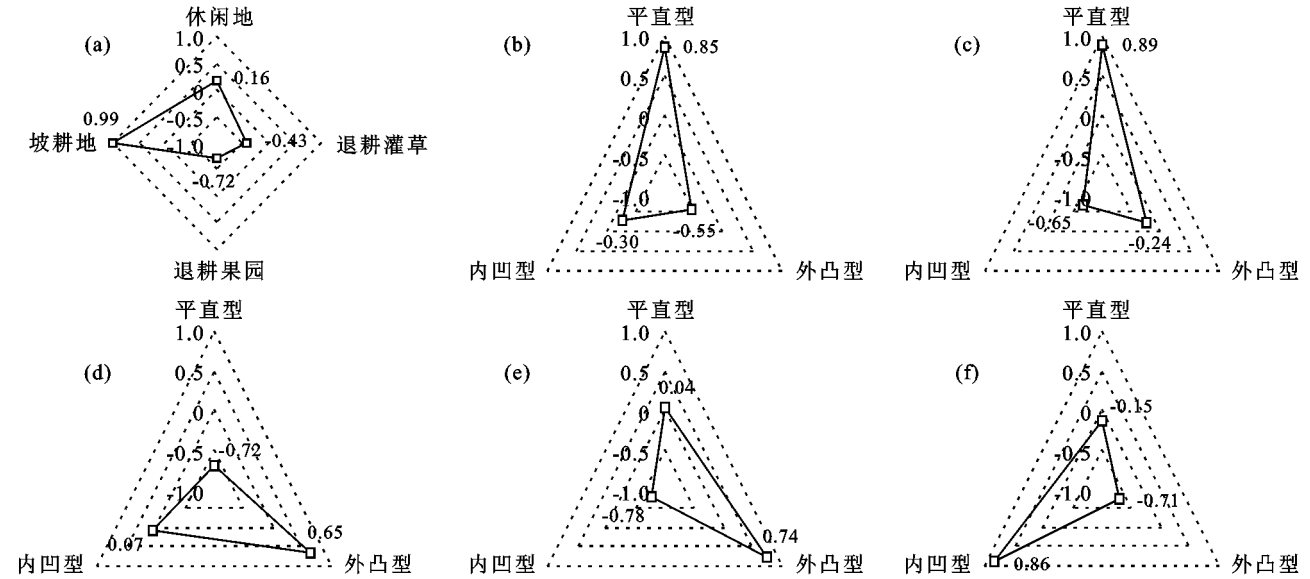


图 3 不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力评价

3 讨论

3.1 退耕对岩—土界面土壤入渗能力影响

退耕还林(草)对岩—土界面土壤入渗能力影响较大,土壤入渗能力与土壤物理性质密切相关^[16]。很多研究^[11,17-18]表明,植被恢复有利于改善土壤水分渗透特性,植被根系及有机质输入等可以增加土壤孔

隙度,降低容重而提高土壤入渗能力。然而,本研究中不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力表现为坡耕地>休闲地>退耕灌草地>退耕果园,表明退耕在一定程度上降低岩—土界面土壤渗透性,与李建明等^[19]研究结果一致,退耕开始至 15~20 年内土壤物理性质恶化,天然降雨、土壤受重力作用等可使土壤沉实,容重增大,降低土壤孔隙度。本研究中退耕 1

年休闲地岩—土界面土壤入渗能力仅为坡耕地的1/6,说明退耕1年岩—土界面土壤沉实速度较快。不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力的主要影响因素为毛管孔隙度和非毛管孔隙度,这是由于土壤入渗速率受重力与毛管吸力共同作用的结果^[20];毛管孔隙中的水受束缚长时间保留,而非毛管孔隙的水易受重力下渗,非毛管孔隙是水分下渗的重要通道^[21]。入渗初始阶段主要推动因素为土壤毛管孔隙,随入渗时间延长,土壤吸力降低,最终靠重力作用下渗^[20],本研究入渗速率在1 min时先增高,后逐渐降低,并在70 min达到稳定,揭示土壤毛管孔隙与非毛管孔隙被水分填充处于饱和状态的变化。耕作活动如定期翻耕、施肥等可使坡耕地耕作层土壤疏松多孔^[22-23],增加非毛管孔隙度,减少毛管孔隙度,是坡耕地岩—土界面土壤入渗能力显著大于退耕样地(休闲地、退耕灌草和退耕果园)(图3a)的重要原因。喀斯特区强烈的化学溶蚀引起土壤黏粒垂直下移^[24]是导致不同退耕类型0—10 cm土层入渗能力大于10—20 cm土层(图2)的重要原因;另外,翻耕、淋溶作用可导致黏粒下移沉积到土壤耕作层底部^[25]。因此,坡耕地岩—土界面土层间入渗能力差异较大。魏彬萌等^[26]研究发现,果园土壤“上松下实”,容重和紧实度均随种植年限和土层深度增加而显著增大,本研究中退耕果园岩—土界面土壤入渗能力较小;0—10 cm土层入渗能力小于10—20 cm土层,与果实采收等践踏行为有关^[27],践踏导致退耕果园表层土壤(0—10 cm)土壤容重增加,孔隙度降低,影响土壤水分入渗能力。

3.2 岩—土界面形态对岩—土界面土壤入渗能力影响

本研究中不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力(图1、图2)显著大于非岩—土界面^[15,28],可能与土壤受岩—土界面流冲刷有关。早有研究^[29]表明,植被覆盖能提高水分下渗,并抑制地表径流形成,石漠化区露石阻碍了地表径流产生^[30]。岩—土界面是喀斯特石漠化区地表露石与土壤层接触部分,被认为是重要的优先流通道,水分通过优先通道部分或全部绕过土壤基质快速下渗到喀斯特地下水文空间^[10]。Wang等^[12]研究发现,露石可以接收大量降雨,并形成岩面流输入附近土壤,直接影响岩—土界面土壤水分分布和入渗过程^[31];岩—土界面流对土壤的冲刷可能加剧细颗粒运移,造成岩—土界面土壤颗粒粗化^[32],提高岩—土界面土壤渗透性。本研究中不同形状岩—土界面土壤入渗能力差异较大,说明岩—土界面形态的影响较大,内凹型岩—土界面具有“汇聚”雨水作用,外凸型岩—土界面具有“分水岭”作用,岩—土界面形态不同,岩面流对岩—土界面土壤的冲

刷程度可能不同,造成不同形状岩—土界面土壤渗透特性差异,但本研究中不同形状岩—土界面土壤入渗能力规律性不显著(图3c、图3d、图3e、图3f),可能与露石汇水面积、倾角等因素有关^[33]。喀斯特自然环境中岩—土界面形态复杂,室内环刀法测定不同形状岩—土界面土壤入渗能力为岩—土界面形态对土壤入渗能力产生影响的结果,如岩—土界面流冲刷引起岩—土界面土壤孔隙度改变而影响其土壤渗透特性,而岩—土界面未参与环刀法中土壤水分入渗过程,自然环境下岩—土界面提供优先流通道而导致石漠化区岩—土界面土壤入渗率远高于非岩—土界面土壤。因此,今后的研究中应考虑岩—土界面形状对土壤入渗影响的过程,如使用圆盘入渗仪法等^[17]原位入渗法测定岩—土界面土壤入渗过程及特征,并扩展更多岩—土界面形态,完善岩—土界面形态因素对石漠化区土壤入渗过程及入渗能力的影响。

4 结论

(1)不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程及特征差异较大,其中以坡耕地内凹型岩—土界面0—10 cm土层渗透性最好,且初渗到稳渗入渗速率的衰减幅度最大,岩—土界面形状对土壤入渗能力影响较大。

(2)不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力与毛管孔隙度极显著负相关($p < 0.01$),与非毛管孔隙度显著正相关($p < 0.05$),与其他影响因素相关性不显著($p > 0.05$)。

(3)与Kostiakov模型和Philip模型相比,Horton模型对岩—土界面土壤入渗过程拟合适用性最好,可以更好地模拟和预测不同退耕类型岩—土界面土壤入渗过程和入渗能力。

(4)退耕明显降低石漠化区露石岩—土界面土壤入渗能力,这种降低在平直型岩—土界面最为显著。不同退耕类型岩—土界面土壤入渗能力主成分分析结果为坡耕地>休闲地>退耕灌草地>退耕果园,不同形状的结果为平直型>内凹型>外凸型。

参考文献:

- [1] 张信宝,王世杰,孟天友,等.农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J].地球与环境,2010,38(2):123-128.
- [2] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [3] 郑惠茹,罗红霞,邹扬庆,等.基于地学信息图谱的重庆岩溶石漠化植被恢复演替研究[J].生态学报,2016,36(19):6295-6307.
- [4] Martin B, Yue Y, Pierre W J, et al. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China

- karst during recent decade[J]. *Earths Future*, 2018, 6(7):1017-1028.
- [5] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, et al. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775(6):e145876.
- [6] Helliwell J R, Sturrock C J, Mairhofer S, et al. The emergent rhizosphere: Imaging the development of the porous architecture at the root-soil interface[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):e14875.
- [7] Deng L, Kim D G, Peng C H, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(11):3974-3984.
- [8] Michaelides K, Lister D, Wainwright J, et al. Vegetation controls on small-scale runoff and erosion dynamics in a degrading dryland environment[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(11):1617-1630.
- [9] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4):54-58.
- [10] Zhao Z M, Shen Y X, Shan Z J, et al. Infiltration patterns and ecological function of outcrop runoff in epikarst areas of Southern China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1):1-10.
- [11] Zhao Z M, Shen Y X, Jiang R H, et al. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2020, 19(1):e20002.
- [12] Wang D J, Shen Y X, Huang J, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in karst landscapes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23:8610-8616.
- [13] 刘婷婷, 彭旭东, 李昌兰, 等. 一种喀斯特石漠化区岩—土界面形态及土壤信息采集方法: 中国, CN202111098857.8[P], 2021.11.12.
- [14] 李叶鑫, 郭宏忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面入渗特征及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(5):1292-1297.
- [15] 朱列坤, 戴全厚, 李焱秋, 等. 喀斯特浅层裂隙土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):47-54.
- [16] 程汉亨, 李勤奋, 王晓敏, 等. 不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6):110-116.
- [17] 王钰, 杨少杰. 贵州喀斯特峡谷地区花椒林地土壤物理性质研究[J]. *中国水土保持*, 2007(11):48-49, 55.
- [18] 徐宗恒, 徐则民, 李凌旭. 植被发育斜坡非饱和带土体优先域及其对水分入渗的贡献: 以云南省呈贡和昭通玄武岩质斜坡为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(5):783-791.
- [19] 李建明, 王志刚, 王爱娟, 等. 退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1):99-108.
- [20] 冯娜, 刘冬冬, 赵荣存, 等. 岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6):162-169, 175.
- [21] 付同刚, 陈洪松, 张伟, 等. 喀斯特小流域土壤含水率空间异质性及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(14):124-131.
- [22] 余冬立, 高雪梅, 房凯. 利用圆盘入渗仪测定不同土地利用类型土壤吸渗率[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18):151-158.
- [23] 孔盼, 夏苏敬, 张海维, 等. 耕作方式对早稻—再生稻稻田氮挥发的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8):1627-1633.
- [24] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(5):441-449.
- [25] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. Impact of vegetation restoration on soil properties in near-surface fissures located in karst rocky desertification regions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200:e104620.
- [26] 魏彬萌, 李忠徽, 王益权. 渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3):976-982.
- [27] 柴锦隆, 徐长林, 杨海磊, 等. 模拟践踏和降水对高寒草甸土壤物理特性和微生物数量的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(2):30-42.
- [28] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(6):12-18.
- [29] Cerdà A. The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 78:321-330.
- [30] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A, et al. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain[J]. *Catena*, 2011, 86(2):98-109.
- [31] 王甲荣, 陈喜, 张志才, 等. 喀斯特溶槽岩—土界面优势流及其对土壤水分动态的影响[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1):109-116.
- [32] 鲍恩侯, 熊康宁, 刘子琦, 等. 喀斯特不同侵蚀场地土壤颗粒分布及可蚀性特征[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(2):156-163.
- [33] 贾洪杰, 甘凤玲, 李振轮, 等. 岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(16):6107-6113.