

喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究

方胜^{1,2,3}, 彭韬^{1,2}, 王世杰^{1,2,*}, 刘秀明^{1,2}, 孟凡德^{1,2,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为查明高异质性背景条件下喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征,在6类典型人为活动方式石灰岩坡地针对4类主要生境类型(土面、土石面、石沟、石缝)开展生境空间分布调查和土壤理化性质分析,并利用Guelph入渗仪进行稳渗率实验。通过对比分析各生境土壤性质和土壤稳渗率关系,结合人为作用方式探讨各生境土壤性质和稳渗率空间变化特征及其演化规律。结果表明:1)喀斯特坡地土壤稳渗率普遍高于非喀斯特地区,喀斯特坡地土壤稳渗率受土壤孔隙和岩石裂隙耦合作用影响。2)各生境条件下土壤稳渗率具有高度的空间异质性,呈现“斑块状”空间分布特征。3)坡地人为作用方式变化将改变原有生境的土壤性质,进而导致各生境土壤稳渗率随人为活动进程发生相应变化。人为踩踏作用影响较小的原生林、次生林和乔灌木坡地土面和土石面生境土壤稳渗率普遍高于石沟和石缝生境,但转变为人为踩踏作用强烈的放牧灌草地或火烧人为干扰地后,土面和土石面生境土壤退化严重,土壤容重和粘粒含量增大,稳渗率显著降低。而石沟和石缝生境土壤性质和稳渗率受影响程度明显小于土面和土石面生境,土壤稳渗率仍可维持较高水平。

关键词:喀斯特;土壤;入渗;稳渗率;异质性;土地利用

中图分类号:S152.7⁺2 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2014)01-0001-10

土壤稳定入渗率(K值),简称土壤稳渗率,是表征土壤水分入渗的重要过程参数,广泛应用于水文过程、灌溉管理,植物水分利用、土壤侵蚀、土壤水分与溶质运移等领域研究^[1]。就定义而言,土壤入渗率一般随入渗时间逐渐降低,并最终趋于稳定状态,此时的入渗速率就是土壤稳定入渗率^[2]。

已有的研究表明,土壤稳渗率与土壤容重、土壤质地、有机质、孔隙度等因素有关^[3]。一般来说,容重越大,孔隙度越小,土壤稳渗率越低^[4]。结构疏松的土壤要比结构紧密的土壤稳渗率要大得多^[5]。土壤有机质的胶结作用由于能够使相对松散的土壤颗粒形成团粒结构,通过促进团聚体的形成对土壤稳渗率产生一定的影响^[6]。目前,关于土壤入渗方面的研究,已在黄土高原区、南方红壤区和川中丘陵区等地开展了大量工作,并取得了丰硕的成果和经验。研究焦点主要集中在土壤入渗能力及其影响因素、入渗空间异质性、降雨入渗与产流关系

等三个方面^[7-9]。但上述几方面的研究主要针对非喀斯特地区,而喀斯特地区土壤入渗研究则主要集中在不同土地利用类型对土壤入渗的影响等方面,如:刘丽红等对喀斯特槽谷区的旱地、荒地和林地的土壤渗透性进行了研究,结果表明,旱地土壤水分入渗能力最好,而荒地较差^[10];陈喜等对喀斯特地区林地、耕地和荒地进行了土壤稳渗率测定,林地平均土壤稳渗率为0.8 cm/min,耕地为0.6 cm/min,裸地为0.01 cm/min,差异显著^[11];张治伟等对不同土地利用类型石灰岩土壤的入渗过程曲线研究表明初始入渗速率和稳定入渗速率均呈现灌丛>果园>草地>旱地^[12]。虽然喀斯特地区土壤入渗能力受土地利用方式影响存在差异,但简单、笼统地在单一土地利用条件下所开展的土壤入渗研究,很难真实地代表和反映高异质性背景下的土壤入渗能力和空间变化规律。

此外,彭韬等人的研究结果已经证实喀斯特坡

收稿日期:2013-01-28;改回日期:2013-04-28

基金项目:国家重大科学研究计划“基于水-岩-土-气-生相互作用的喀斯特地区碳循环模式及调控机理”(2013CB956700)、中国科学院战略性先导科技专项重大课题“典型石漠化地区植被恢复和增汇技术的试验示范”(XDA05070400)和国家自然科学基金创新群体项目(40721002)资助,贵州省科学技术基金(黔科合J字[2013]2292)。

第一作者简介:方胜(1987-),男,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。E-mail: mrfunshion@hotmail.com.

*通讯作者:王世杰,男,研究员。E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn.

地年均地表径流系数低, <5%, 90%以上的降雨通过土壤和表层岩溶带入渗到地下^[13], 喀斯特地区表层岩溶带的发育对入渗具有重要影响^[14]。由于喀斯特地区表层岩溶带的存在, 导致了坡地岩土组构特点显著区别于非喀斯特地区, 呈现出上覆土壤土层浅薄、土壤发生层不明显, 土壤和岩石直接突变接触, 土体分布不连续, 异质性强等特点。土壤与岩石构成了复杂多样的喀斯特小生境类型(如石沟、石缝、石面、土石面、石洞、石坑等), 在改变地表微地貌特征的同时, 也改变了喀斯特坡地各生境条件下土壤性质和入渗介质条件^[15]。而目前对此类特殊岩土组构发育背景条件下土壤入渗能力、空间分布特征等方面研究薄弱, 对影响入渗的关键性控制因素也存在很大的不确定性。

另一方面, 由于人为长期活动作用(如过度砍伐和樵采、过度放牧等), 喀斯特坡地土壤退化特征和过程也与生境类型紧密相关^[16], 随着人为活动方式的改变, 原有生境条件下的土壤性质也随之发生变化, 进而可能对坡地土壤入渗能力和空间分布特征等方面产生重要影响, 但目前对此类问题的研究也尚未见报道。

为此, 本研究选择了6类典型人为活动方式下

的喀斯特石灰岩坡地, 通过对坡地内4类主要生境类型的土壤性质和土壤稳定入渗率的测定和分析, 探讨高异质性生境条件下喀斯特坡地土壤入渗的空间变化特征及其影响因素, 揭示人为活动方式对其影响规律, 为喀斯特地区坡面水循环、土壤侵蚀、水资源利用等相关领域研究提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省普定县陈旗小流域(北纬 $26^{\circ}15'36'' \sim 26^{\circ}15'56''$, 东经 $105^{\circ}43'30'' \sim 105^{\circ}44'42''$)。该区多年年均降雨量约为1300 mm, 降雨主要集中在5~10月。气温变化范围在 $-1^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 之间, 年平均气温为 14°C 。下伏基岩为三叠系中统关岭组灰岩。表层岩溶带强烈发育, 坡面表层岩溶带平均厚度3~6 m。流域内土地利用类型多样, 为典型农林复合生态系统, 其中山体中上部植被主要以落叶阔叶—常绿混交林为主, 中部和下部以灌草地为主。流域内农业活动强烈, 主要集中在山体中下部和洼地, 部分在山体中上部(图1)。

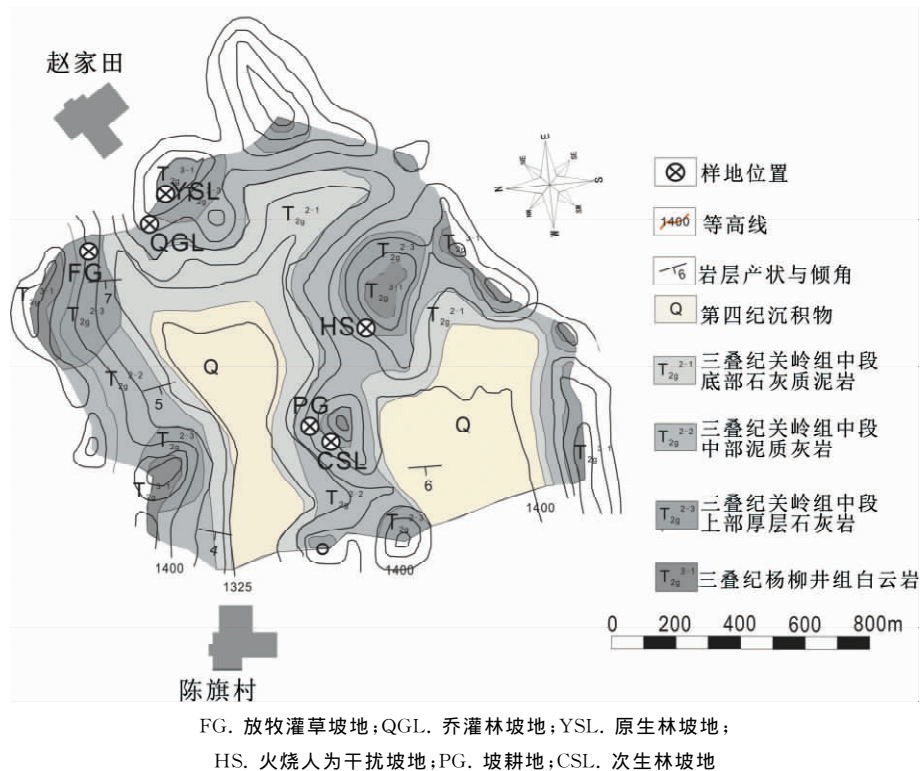


图1 陈旗小流域地形、岩性和样方位置(根据彭韬等^[14]结果修改)

Fig 1 Terrain and location of research site in the Chenqi catchment (modified after ref. [14]).

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与采样方法

根据流域内人为作用方式和植被覆盖条件,分别选择了原生林坡地、乔灌林坡地、次生林坡地、放牧灌草坡地、火烧人为干扰坡地和坡耕地 6 类不同喀斯特坡地为研究样地,每个样地设置一个 10 m×10 m 样方(图 1),各样方基本情况见表 1。每个样方按其小生境类型及其面积权重,选择了土面、土石面、石沟和石缝四类小生境进行野外原位土壤入渗实验和相应的土样采集。坡耕地样方由于土壤平整且连续分布,小生境类型单一,土层较厚,全部归为土面生境,故样点选择采用 S 型法则。其它样方样点选择和土样采集按照王世杰等人在 2007 年确立的喀斯特小生境代表性土壤采集方法^[17]。其中,土面生境是以土壤深度>30 cm,连续分布面积>1 m² 为标准;土石面生境土壤深度≤30 cm,土壤与下伏岩石界面突变接触,连续分布面积>1 m²;石沟生境两头有开口,沟内土壤深度>30 cm,沟内土

壤分布深宽比介于 2~5 之间;石缝生境形态特征与石沟相似,深宽比>5,土壤总量低于石沟。由于石沟和石缝生境形态特征较为一致,故本文把石沟和石缝归为一类讨论。样方各生境面积权重及样点数量见表 2。

1.2.2 土壤理化性质测定

土壤水分测定采用土壤烘干法(105℃, 8~10 h)^[18]。土壤容重测定采用环刀法,土壤容重(g/cm^3)=(M-G)×100/[V(100+W)],式中,M 为环刀及湿土重/g;G 为环刀重量/g;V 为环刀体积/ cm^3 ;W 为土壤含水量/%^[19]。土壤比重采用比重瓶法(F-HZ-DZ-TR-0003)。土壤孔隙度结果由孔隙度(%)=(1-容重/比重)×100 计算得到。

土壤有机质含量测定采用 TOC 法,利用元素分析仪测定土壤样品的 TOC 值,再用 TOC 值乘以系数 1.724(总有机碳与有机质转化系数)即得到土样有机质含量^[20]。

土壤粒度分析采用英国马尔文公司 Mastersize

表 1 各样方基本情况

Table 1 Site information of land use

土地利用现状	人为作用方式	坡度(°)	坡位	乔木覆盖率(%)	灌木覆盖率(%)	地表覆盖率(%)	基岩裸露率(%)
原生林坡地	未受人为作用影响	38	中部	96	25	42	48
放牧灌草坡地	长期放牧	37	中上部	0	10	78	32
乔灌林坡地	樵采和放牧	36	中部	85	27	45	45
火烧人为干扰坡地	2007 年 2 月火烧后定期人为清除恢复植被	32	中上部	0	10	70	40
次生林坡地	80 年代开始毁林伐木,2000 年后封山育林	31	中部	60	80	68	42
坡耕地	玉米—油菜轮作	30	中下部	0	0	25	10

表 2 样方各生境面积权重及样点数量

Table 2 Site percentage of area and distribution according to land use and micro-habitat

样方类型	石沟和石缝(%)	土面(%)	土石面(%)	石面(%)	其他(%)	总数
原生林坡地	5(3)	17(3)	29(4)	47	2	10
放牧灌草坡地	9(3)	29(4)	30(4)	30	2	11
乔灌林坡地	7(3)	17(4)	29(4)	46	1	11
火烧人为干扰坡地	8(3)	25(3)	27(4)	37	3	10
次生林坡地	6(3)	33(4)	17(3)	43	1	10
坡耕地		90(10)		8	2	10

注:其它是指石洞、石坑等生境类型;坡耕地土壤平整且连续分布,土层较厚,小生境类型单一,故全部归为土面。

2000型激光粒度仪测定^[21]。土壤粒度分级采用国际制标准。

1.2.3 土壤稳定入渗率测定

土壤稳渗率实验采用美国 Guelph 土壤入渗仪。通过测定不同水头高度的入渗率来计算土壤的稳渗率 K 值^[22]。其计算公式如下:

$$K=0.145099 \times R_2 - 0.191106 \times R_1$$

式中: R_1 为土壤入渗仪水头 $H=5$ cm 时的稳定入渗速率; R_2 为土壤入渗仪水头 $H=10$ cm 时的稳定入渗速率。

1.2.4 数据处理

数据成图采用 CorelDRAW Graphics Suite 12 和 Sigmaplot10.0 软件完成。

2 结果

2.1 不同人为活动方式坡地和各生境条件土壤特征

2.1.1 不同人为活动方式坡地土壤特征

不同人为活动方式下,各样方土壤理化性质存在较大的差异(表3)。6类不同人为活动方式坡地的样方中,受人为活动作用影响较弱的原生林样方、乔灌林样方和次生林样方的有机质含量均值超过11%,容重均值在0.61~0.72 g/cm³,孔隙度均值变化范围为62.30%~76.19%,粘粒比例均值在13%以下。而人为活动作用影响较强的火烧人为

干扰地样方、放牧灌草样方和坡耕地样方,容重均值超过0.84 g/cm³,孔隙度变化范围为56.64%~62.30%,粘粒比例在12%以上。但火烧人为干扰地样方有机质高于放牧灌草样方和坡耕地样方,均值分别为11.93%、5.46%和6.45%。

2.1.2 不同生境类型的土壤特征

受生境类型的影响,土壤特征在各生境条件下呈现高异质性特点(表4)。在受人为活动作用较弱的原生林样方、乔灌林样方和次生林样方中,有机质与孔隙度均表现为土石面>土面>石沟和石缝,容重和土壤粘粒均表现为石沟和石缝>土面>土石面。与之相反,在人为活动作用较强的放牧灌草样方、坡耕地样方和火烧人为干扰地样方中,有机质与孔隙度均表现为石沟和石缝生境比土面和土石面生境高,容重和土壤粘粒均表现为石沟和石缝生境比土面和土石面生境低。总体来说,从人为活动作用较弱的坡地到人为活动作用较强的坡地生境间土壤性质存在较大差异。

根据各生境土壤性质与土壤稳渗率相关性分析表明,土壤理化性质与稳渗率之间存在较好的相关性(表5)。有机质含量与稳渗率呈正相关,且达到显著水平。而土壤容重和粘粒与稳渗率呈现显著的负相关关系。孔隙度与稳渗率无明显的相关性。

表3 不同人为活动方式坡地土壤特征

Table 3 Soil characteristics of different land uses

土地利用类型	有机质 (%)	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	粒度(采用国际制标准)		
				粘粒 (<0.002mm, %)	粉砂 (0.02~0.002mm, %)	砂粒 (2~0.02mm, %)
原生林坡地	12.89	0.72	67.57	12.02	66.72	21.25
次生林坡地	12.84	0.65	76.19	9.70	69.14	21.16
乔灌林坡地	11.96	0.61	65.40	11.87	66.93	19.69
放牧灌草坡地	5.46	1.08	56.64	15.50	69.98	13.71
坡耕地	6.45	1.06	60.03	15.97	70.49	13.54
火烧人为干扰坡地	11.93	0.84	62.30	12.87	75.13	13.90

表 4 不同样方各生境土壤性质

Table 4 Soil characteristics of micro-habitats in different land uses

土壤理化性质	生境类型	原生林坡地	次生林坡地	乔灌林坡地	火烧人为干扰坡地	放牧灌草坡地
有机质(%)	土面	13.15	12.92	12.73	10.62	7.38
	土石面	12.46	13.12	13.03	11.05	6.78
	石沟和石缝	10.01	12.30	10.58	13.58	8.61
容重(g/cm ³)	土面	0.79	0.73	0.81	0.89	1.09
	土石面	0.71	0.72	0.76	0.85	1.02
	石沟和石缝	0.88	0.82	0.86	0.81	1.01
孔隙度(%)	土面	68.83	67.63	64.95	61.73	56.08
	土石面	71.66	71.85	66.77	62.24	59.13
	石沟和石缝	63.57	62.03	63.74	62.76	59.41
粘粒(<0.002 mm, %)	土面	9.98	9.88	11.27	13.34	17.52
	土石面	8.79	8.52	10.56	13.48	17.17
	石沟和石缝	10.98	11.20	13.31	12.06	15.98
粉砂(0.02~0.002 mm, %)	土面	65.42	69.15	68.34	74.37	66.24
	土石面	65.98	69.34	66.07	74.04	76.93
	石沟和石缝	68.26	68.83	66.51	76.52	66.56
砂砾(2~0.02mm, %)	土面	22.61	20.97	19.05	14.95	16.24
	土石面	22.23	22.14	19.66	14.81	5.90
	石沟和石缝	19.51	19.96	20.18	12.42	14.80

表 5 土壤性质与土壤稳渗率相关性分析

Table 5 Correlative analysis between soil characteristics and soil steady-state infiltration rates

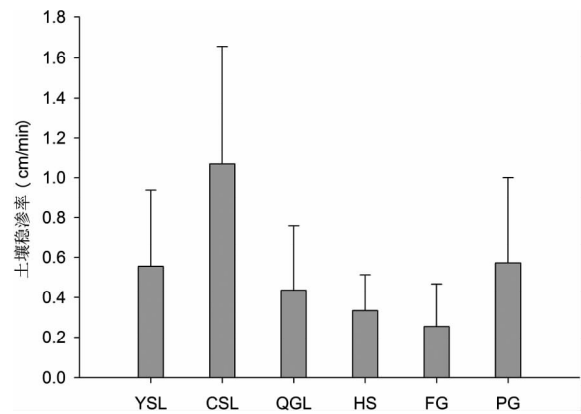
	有机质	容重	孔隙度	<0.002mm粘粒	土壤稳渗率
有机质	1	-0.664**	0.627**	-0.643**	0.778**
容重		1	-0.772**	0.708**	-0.682**
孔隙度			1	-0.673**	0.398**
<0.002 mm粘粒				1	-0.651*
土壤稳渗率					1

注：*，** 分别表示相关系数达 0.05, 0.01 显著水平。

2.2 不同人为活动方式坡地和各生境类型土壤稳渗率变化规律

2.2.1 不同人为活动方式坡地土壤稳渗率特征

不同人为活动方式的石灰岩坡地土壤稳渗率差异较大(图 2)。具体表现为次生林坡地>坡耕地>原生林坡地>乔灌林坡地>火烧人为干扰坡地>放牧灌草坡地。次生林坡地各生境平均土壤稳渗率为 1.07 cm/min, 坡耕地为 0.57 cm/min, 原生林坡地为 0.56 cm/min, 火烧人为干扰坡地为 0.33 cm/min, 乔灌林坡地为 0.44 cm/min, 放牧灌草坡地为 0.25 cm/min。



YSL,原生林坡地;CSL,次生林坡地;QGL,乔灌林坡地;HS,火烧人为干扰坡地;FG,放牧灌草坡地;PG,坡耕地

图 2 不同人为活动方式坡地土壤稳渗率
Fig. 2 Soil steady-state infiltration rates of different land uses

2.2.2 不同生境类型土壤稳渗率特征

同一人为活动方式坡地的样方内各生境间土壤稳渗率呈现显著差异(图 3)。原生林样方、次生林样方和乔灌林样方土面和土石面生境土壤稳渗率明显高于石沟和石缝生境。而在放牧灌草样方和火烧人为干扰地样方生境土壤稳渗率的变化趋势与之相反,平均土壤稳渗率表现为石沟和石缝>

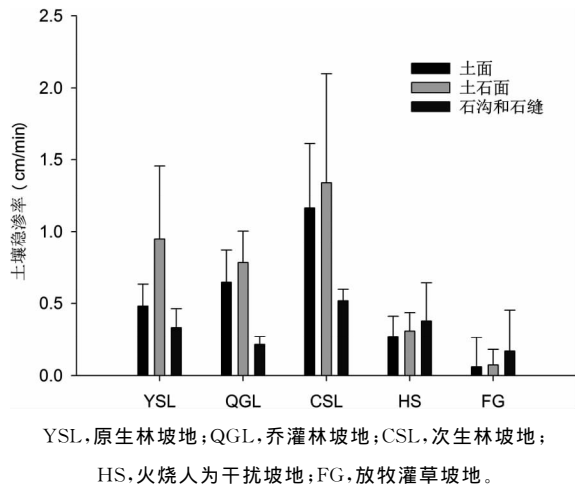


图 3 不同生境类型土壤稳渗率

Fig. 3 Soil steady-state infiltration rates of micro-habitats in different land uses

土石面 > 土面。

2.2.3 土壤稳渗率空间异质性

根据野外实际调查和土壤稳渗率实测资料,绘制了 5 类(除坡耕地样方)人为活动方式坡地样方(10 m×10 m)生境空间分布图(图 4~7)。各生境类型土壤分布面积和与之对应的土壤稳渗率见表 6~10。总体上,5 类不同人为活动方式坡地的样方中,石面生境分布面积较大,占各样方 30%~47%;

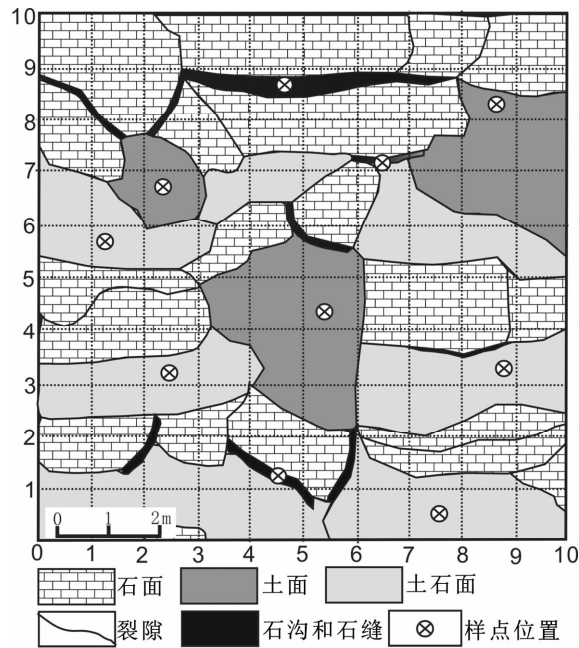


图 4 原生林坡地样方生境空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of micro-habitats in original forest

石沟和石缝生境分布面积普遍小于土面和土石面生境,面积变化范围分别为 5%~9%,17%~33%。生境空间分布异质性高,在空间上呈现“斑块状”分布特点。

受土壤生境空间分布异质性影响,各生境间土壤稳渗率也具有较大差异,也相应地呈现出“斑块状”的空间分布特征。其中,原生林样方、乔灌木样方和次生林样方中土石面生境稳渗率较大,变化范围为 2.18~0.56 cm/min,均值变化范围为 1.34~0.79 cm/min,土面、石沟和石缝的稳渗率较小,变化范围分别为 1.59~0.06 cm/min,0.58~0.01 cm/min,均值变化范围分别为 1.16~0.48 cm/min,0.52~0.22 cm/min(表 6~8)。而在火烧人为干扰坡地样方和放牧灌草坡地样方中,石沟和石缝生境的稳渗率较大,变化范围为 1.49~0.10

表 6 原生林坡地样方生境空间分布与土壤稳渗率

Table 6 Soil steady-state infiltration rates and spatial distribution of micro-habitats in original forest

生境类型	面积(m ²)	土壤稳定入渗率(cm/min)		
		平均值	最大值	最小值
石沟和石缝	5	0.33	0.45	0.16
土面	17	0.48	0.66	0.37
土石面	29	0.95	1.52	0.59

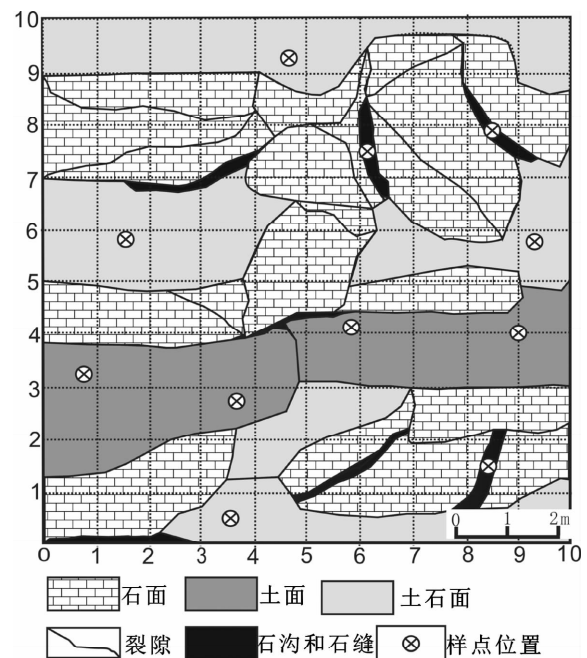


图 5 乔灌木坡地样方生境空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of micro-habitats in mixed arbor and shrub forest

cm/min, 均值变化范围为 0.38~0.17 cm/min, 土面和土石面生境稳渗率较小, 变化范围分别为 0.43~0.05 cm/min, 0.43~0.02 cm/min, 均值变化范围分别为 0.27~0.06 cm/min, 0.31~0.07 cm/min (表 9 和表 10)。

表 7 乔灌坡地样方生境空间分布与土壤稳渗率
Table 7 Soil steady-state infiltration rates and spatial distribution of micro-habitats in mixed arbor and shrub forest

生境类型	面积(m ²)	土壤稳定入渗率(cm/min)		
		平均值	最大值	最小值
石沟和石缝	7	0.22	0.52	0.01
土面	17	0.65	1.59	0.06
土石面	29	0.79	0.80	0.56

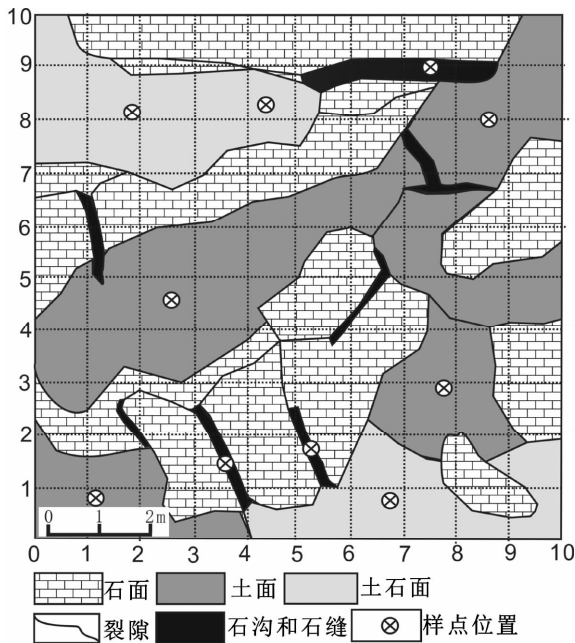


图 6 次生林坡地样方生境空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of micro-habitats in young forest

表 8 次生林坡地样方生境空间分布与土壤稳渗率
Table 8 Soil steady-state infiltration rates and spatial distribution of micro-habitats in young forest

生境类型	面积(m ²)	土壤稳定入渗率(cm/min)		
		平均值	最大值	最小值
石沟和石缝	6	0.52	0.58	0.46
土面	33	1.16	1.55	0.67
土石面	17	1.34	2.18	0.71

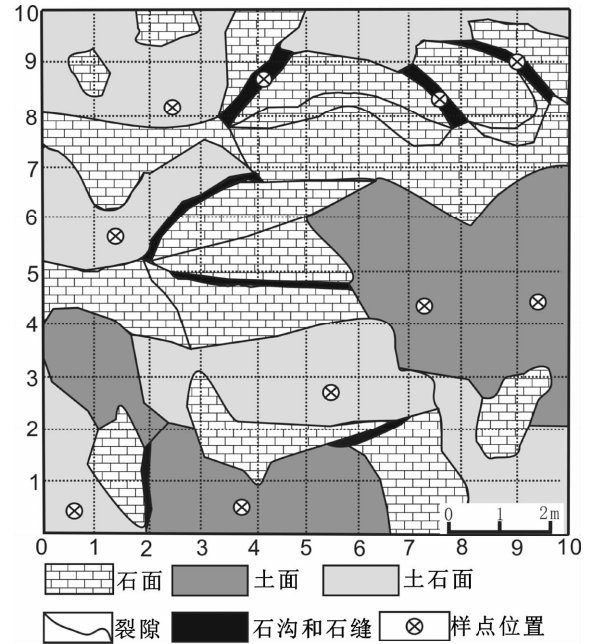


图 7 火烧人为干扰坡地样方生境空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of micro-habitats in burned forest

表 9 火烧人为干扰坡地样方生境空间分布与土壤稳渗率
Table 9 Soil steady-state infiltration rates and spatial distribution of micro-habitats in burned forest

生境类型	面积(m ²)	土壤稳定入渗率(cm/min)		
		平均值	最大值	最小值
石沟和石缝	8	0.38	1.49	0.49
土面	25	0.27	0.43	0.16
土石面	27	0.31	0.43	0.02

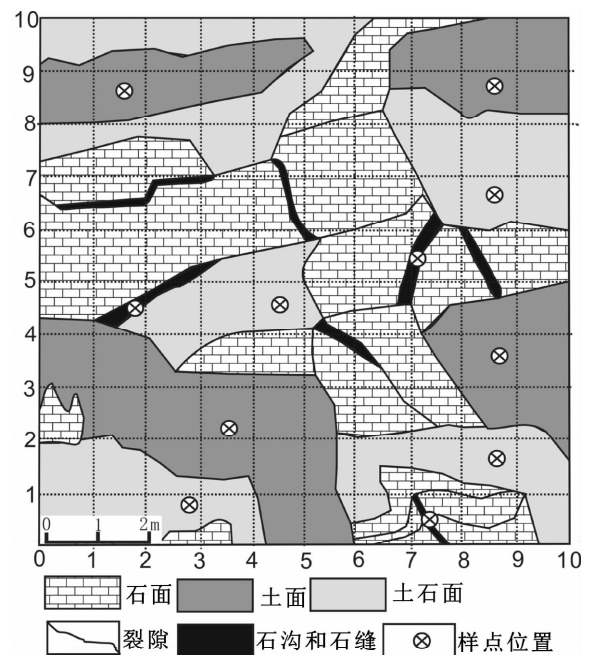


图 8 放牧灌草坡地样方生境空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of micro-habitats in pastureland

表 10 放牧灌草坡地样方生境空间分布与土壤稳渗率
Table 10 Soil steady-state infiltration rates and spatial distribution of micro-habitats in pastureland

生境类型	面积(m ²)	土壤稳定入渗率(cm/min)		
		平均值	最大值	最小值
石沟和石缝	9	0.17	0.25	0.10
土面	29	0.06	0.10	0.05
土石面	30	0.07	0.13	0.03

3 讨论

喀斯特坡地土壤稳渗率受其岩土组构特点影响,相比非喀斯特地区普遍较高,并在不同生境条件状况影响下呈现斑块状的空间变化特征。另外,在人为作用方式改变后,土壤稳渗率空间分布特点也随土壤性质的改变而发生变化。

3.1 岩土组构特点对土壤稳渗率的影响

喀斯特各类型坡地土壤稳渗率研究结果表明,喀斯特坡地土壤稳渗率变化范围为 0.05~2.18 cm/min,相比非喀斯特地区高,非喀斯特地区相似质地土壤稳渗率的普遍变化范围为 0.03~0.64 cm/min^[23-26]。造成此现象的原因可能有以下两个方面:1)喀斯特坡地石灰土土壤肥沃。喀斯特坡地石灰土有机质含量高,团粒结构稳定,而具良好团粒结构的土壤,其蓄水、透水、通气性更加良好^[27],有助于土壤水分入渗。2)喀斯特坡地特殊的岩土组构发育特点。由于土层浅薄,且与岩石直接突变接触,导致土壤水分能快速地穿过土层后到达土壤与岩石交界面。而喀斯特地区岩石界面往往是表层岩溶带岩石裂隙最为广泛发育的地带,导致土壤稳渗率值较大。陈喜等的研究结果表明,在无岩石裂隙发育的土壤稳渗率为 1.0 cm/min,而在裂隙发育基岩上的土壤稳渗率为 8.5 cm/min^[11]。因此,喀斯特地区土壤水分的入渗在很大程度上受到岩石裂隙发育影响,喀斯特地区土壤稳渗率应是土壤孔隙和下伏基岩裂隙耦合作用的结果。

3.2 生境条件对喀斯特坡地土壤稳渗率的影响

喀斯特坡地四类生境条件下土壤稳渗率的测定结果表明,同样人为活动方式下的四类生境土壤稳渗率差异显著,原因在于生境微地貌发育形态特征决定了其生境土壤性质和土壤退化过程。相对于石沟和石缝生境而言,土面和土石面生境往往具有较大的土壤分布面积,在未受人为活动影响状态

下,相比土壤分布面积较小的生境(如石沟、石缝)更有利于表层土壤有机质的累积,土壤结构和孔隙度等发育较好。反之,在人为活动较强状态下,土面和土石面生境较石沟和石缝生境更具有可利用价值,往往也最容易受人为干扰和破坏,导致土面和土石面生境土壤退化现象严重,因此,植被往往优先选择水气条件相对较好的石沟和石缝生境进行种子萌发和维持生长。植物根系在石沟和石缝生境的广泛发育,易形成土壤的大孔隙结构,使水分在土壤运移中出现大量优先流过程。Cameira 等人的研究发现,大孔隙的存在使土壤饱和导水率增加了几倍,对总入渗量贡献率高达 85%^[28]。因此在优先流作用影响下的生境土壤稳渗率值较大。

3.3 人为作用方式对喀斯特坡地土壤稳渗率的影响

人为作用方式改变对喀斯特坡地原有各类生境土壤性质和土壤稳渗率产生了不同程度的影响。原生林、乔灌林和次生林坡地由于较早实施了封禁政策,坡地保持了较高的植被覆盖率,凋落物丰富,微生物活跃,使凋落物在其分解后更易于形成腐殖质增加了各生境土壤有机质含量,与粘粒结合形成微团聚体,增大了各生境内土壤孔隙度^[29],有利于土壤水分入渗,使各生境土壤稳渗率均保持在较高水平。但人为作用方式改变后,各类生境土壤性质和土壤稳渗率受到不同程度影响:当原生林改变利用方式为放牧灌草坡地后,土面和土石面生境容易受到踩踏作用的影响,容重增大了 42.5%,有机质和孔隙度分别降低了 49%和 33.6%,土壤紧实度增强,土壤稳渗率降幅高达 91.5%;而石沟和石缝生境由于自身生境形态发育特点,较好地保存了土壤水、气条件,土壤性质和土壤稳渗率受影响程度较小,容重仅增大了 15.6%,有机质下降了 13.4%,孔隙度下降了 5.7%,稳渗率降低了 52.5%。

人为火烧干扰坡地在 2007 年人为火烧后,各生境土壤表层累积了大量火烧后的植物灰份,因此各生境土壤有机质含量仍维持了较高水平,相对于原生林,土面和土石面生境有机质下降 15.4%。但火烧后的每年定期清除恢复植被,对各生境土壤具有一定人为踩踏作用,使各生境(特别是土面和土石面)地表覆盖度降低,土壤紧实度增强,土面和土石面生境土壤容重增大 13.3%,孔隙度下降 11.8%,通透性变差,稳渗率降低 54.8%。而石沟和石缝生境土壤容重仅增大 7.4%,有机质增大 26.3%,孔隙

度下降 1.3%, 稳渗率降低 16.8%。各生境土壤性质和稳渗率的变化趋势与原生林改变为放牧灌草地后趋势一致, 总体呈现土面和土石面生境较石沟和石缝生境土壤退化严重, 稳渗率降低的特点。

林地转变为坡耕地后, 由于长期耕种, 相对于原生林土面生境, 土壤容重增大 25.1%, 有机质损失严重, 降低 51.0%, 孔隙度下降 12.8%, 土壤性质发生了很大变化。但受到犁耕作用影响, 原有土壤结构遭到破坏, 反而增强了坡耕地犁耕层土壤水分入渗能力。与原生林土面生境土壤稳渗率相比, 土壤稳渗率仅增大 16.0%, 与原生林土面具有相似的土壤水分入渗能力。

4 结论

1) 喀斯特坡地土壤稳定入渗率普遍高于非喀斯特地区。主要受到石灰土自身土壤性质和表层岩溶带裂隙发育共同影响。由于土层浅薄且与基

岩裂隙直接接触, 喀斯特坡地土壤稳定入渗率应是土壤孔隙和岩石裂隙耦合作用下的稳定入渗速率。

2) 各类生境条件下土壤稳渗率呈现高度的空间异质性。喀斯特坡地土壤稳渗率空间变化特点与其对应生境空间分布特征一致, 出现“斑块状”的空间分布规律。

3) 坡地人为作用方式变化将改变原有生境条件下的土壤性质, 进而导致各类生境条件的土壤稳渗率随坡地人为活动作用进程发生相应变化。人为踩踏作用影响较小的原生林、次生林和乔灌林地土面和土石面生境的土壤稳渗率普遍高于石沟和石缝生境, 但转变为人为踩踏作用强烈的放牧灌草地或火烧人为干扰地后, 土面和土石面生境土壤稳渗率显著降低, 而石沟和石缝生境土壤稳渗率受其影响程度较小, 在表层岩溶带裂隙发育作用下仍可维持较高水平。

参 考 文 献

- [1] 雷廷武, 刘汗, 潘英华, 等. 坡地土壤降雨入渗性能的径流—入流—产流测量方法与模型[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2005, 35(12): 1180—1186.
- [2] Cerdà A. Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone [J]. Journal of Hydrology, 1997, 198: 209—225.
- [3] 夏江宝, 杨吉华, 李红云. 不同外界条件下土壤入渗性能的研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 115—117.
- [4] 李卓, 吴普特, 马浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40—45.
- [5] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 537—540.
- [6] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(1): 59—62.
- [7] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 471—476.
- [8] 王维汉, 陈晓东, 激锡文, 等. 土壤入渗参数的估算方法及其变异性研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 272—275.
- [9] 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 214—231.
- [10] 刘丽红, 蒋勇军, 王翱宇, 等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 52—59.
- [11] Chen X, Zhang Z C, Chen X H, *et al.* The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China [J]. Environ Earth Sci, 2009, 59: 811—820.
- [12] 张治伟, 朱章雄, 王燕, 等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71—76.
- [13] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125—129.
- [14] Peng T, Wang S J. Effect of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest of China [J], Catena, 2012, 90: 53—62.
- [15] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1054—1062.
- [16] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 1—7.
- [17] 王世杰, 卢红梅, 周云超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 475—483.

- [18] 霍洪元,孙淑玉,刘影. 浅谈土壤水分测定技术及土壤水分动态的研究[J]. 水利科技与经济,2010,16(2): 165—166.
- [19] 孔凡伟. 如何测土壤容重[J]. 黑龙江农业科学,2010,10: 178.
- [20] 钱宝,刘凌,肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(1): 34—39.
- [21] 雷国良,张虎才,张文翔,等. Mastersize2000型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义——以洛川剖面S4层古土壤为例[J]. 沉积学报,2006,24(4): 531—539.
- [22] 于东升,史学正. 用 Guelph 法研究南方低丘缓坡地不同坡位土壤渗透性[J]. 水土保持通报,2002,22(1): 6—9.
- [23] 袁建平,张素丽,张春燕,等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. 土壤学报,2001,38(4): 579—583.
- [24] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报,2008,19(5): 1040—1045.
- [25] 陈丽华,余新晓. 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J]. 北京林业大学学报,199517(1): 42—47.
- [26] 霍小鹏,李贤伟,张健,等. 川西亚高山不同植被类型土壤贮水与入渗性能试验[J]. 中国水土保持科学,2009,7(6): 74—79.
- [27] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展,2003, 18(1): 38—44.
- [28] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal [J]. Soil and Tillage Research,2003, 70(2): 131—140.
- [29] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 农业工程科学报,2008, 24(7): 494—499.

Spatial Variation of Soil Steady-State Infiltration Rates in Karst Hillslopes

FANG Sheng^{1, 2, 3}, PENG Tao^{1, 2}, WANG Shi-jie^{1, 2}, LIU Xiu-ming^{1, 2}, MENG Fan-de^{1, 2, 3}

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research Station, Guizhou, Puding 562100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To find out the spatial variation of soil steady-state infiltration rates in karst hillslopes, the spatial distribution and soil properties of four habitats (soil surface, soil-rocky surface, rocky gully, and stone crevice) were investigated along six karst hillslopes with typical human activities. The soil steady-state infiltration rates were measured by means of a Guelph Permeameter. The statistical results show that: 1) the soil steady-state infiltration rates of karst hillslopes are obviously high as compared to non-karst regions, and mainly controlled by soil porosities and cracks of Epikarst coupling; 2) the soil steady-state infiltration rates of four habitats show high spatial heterogeneity and “patch shape” spatial characteristics in karst hillslopes; and 3) transfer of human activities will modify soil properties of habitats, and then change the steady-state infiltration rates. The soil steady-state infiltration rates of soil surface and soil-rocky surface are higher than those of rocky gully and stone crevice in original forest, young forest and mixed arbor and shrub forest with smaller human influence. Soil bulk density and clay proportion of soil surface and soil-rocky surface increase seriously and contrary soil porosity and steady-state infiltration rates significantly decrease when the hillslopes are transformed to burned forest or pastureland. Under the same condition, soil properties and steady-state infiltration rates of rocky gullies and stone crevices affect less significantly than the soil surface and soil-rocky surface habitat, which still have high soil steady-state infiltration rates.

Key words: karst; soil; water infiltration; soil steady-state infiltration rate; heterogeneity; land use