

石灰岩与白云岩坡地土壤饱和导水率对比研究

孟凡德^{1,2,3}, 彭韬^{1,2}, 王世杰^{1,2}, 蔡先立^{1,2}, 张林^{1,2}

(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, 贵州 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: [目的] 对比研究不同下垫面特征和土地利用方式对两类坡地表层土壤性质及其土壤饱和导水率(K_s)的影响。[方法] 以喀斯特地区不同岩性下垫面的石灰岩和白云岩两类坡地表层土壤为研究对象, 采用 Guleph 稳定入渗仪和土壤分析的方法。[结果] (1) 石灰岩和白云岩表层土壤在受到放牧作用影响后, 土壤均呈现显著退化趋势, 其容重、黏粒含量增大, 孔隙度、有机质含量降低。(2) 石灰岩和白云岩两类坡地表层土壤在未受到人为干扰的自然植被条件下, 由于表层岩溶带的发育, K_s 都很高, 平均值分别为 328.6 和 257.2 mm/h。其中, 石灰岩坡地相比白云岩坡地, K_s 具有更高的空间变异性, 二者 K_s 变异系数变化范围分别为 90.71%~95.62% 和 59.60%~67.32%。(3) 受到放牧作用影响后, 石灰岩和白云岩坡地表层土壤 K_s 相比自然植被状态下呈显著降低趋势, K_s 分别降低 52.2% 和 86.7%, 白云岩坡地 K_s 降低程度大, 高于石灰岩坡地。

关键词: 石灰岩; 白云岩; 喀斯特; 饱和导水率(稳渗率); 土壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0085-05

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.016

Comparative Study on Saturated Hydraulic Conductivity of Limestone and Dolomite Slope

MENG Fande^{1,2,3}, PENG Tao^{1,2}, WANG Shijie^{1,2}, CAI Xianli^{1,2}, ZHANG Lin^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,

Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research

Station, Puding, Guizhou 562100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To analyze the influence of land use and lithology on soil properties and saturated hydraulic conductivities (K_s). [Methods] The surface soil from limestone and dolomite slopes in karst region was took as the study objective, and Guelph parameter and soil laboratory analysis were used. [Results] (1) Under over grazing condition, soil bulk density and clay content increased and porosity and organic matter content decreased significantly on both of limestone and dolomite slopes. (2) Under undisturbed land use condition, K_s of limestone and dolomite soil was very high, the average value was 328.6 mm/h and 257.2 mm/h respectively. Compared to dolomite slope, the spatial distribution of K_s on limestone slope was more heterogeneities that coefficients of variations ($C_v\%$), which changed between 90.71% and 95.62%. (3) Under the influence of over grazing, the K_s of limestone and dolomite soil decreased by 52.2% and 86.7% respectively, significantly lower than average values.

Keywords: limestone; dolomite; karst; saturated hydraulic conductivity; soil

土壤饱和导水率(K_s)是土壤全部孔隙都充满水的情况下,在单位梯度作用下,通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流通量或渗流速度^[1],易受土壤容重、质地、土壤结构、有机质含量、土地耕作利用方

式等诸多因素影响^[2-4],且空间变异性强^[5]。饱和导水率对于土壤是一个常数^[6],对表征水分的入渗能力,影响水分入渗、径流产生及蒸散三者之间的分配关系具有重要作用^[7],是决定水分循环过程的重要参

收稿日期:2014-03-03

修回日期:2014-03-14

资助项目: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);国家自然科学基金创新群体项目(40721002);中国科学院“西部之光”西部博士项目;贵州省科学技术资助项目(20132292)

第一作者:孟凡德(1988—),男(汉族),山东省临沂市人,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。E-mail:mfd5566@sina.com。

通信作者:王世杰(1965—),男(汉族),贵州省贵阳市人,博士,研究员,主要从事环境地球化学研究。E-mail:wangshijie@vip.skleg.cn。

数之一^[8]。同时,作为研究水分、溶质在土壤中运动规律的重要土壤水文参数^[7],在土壤水分、溶质(盐分、养分)运移动力学模拟研究中,也发挥着重要作用^[9]。因此,研究土壤饱和和导水率对评价水源涵养、土壤水盐运移模拟计算、生态恢复及土壤水分的有效利用与管理具有重要的意义。

目前对于土壤导水率的研究,多集中于非喀斯特地区,且研究内容多数集中在测定方法和模型预测,以及土壤有机质、植被覆盖度、土壤容重、不同土地利用类型等因素对土壤饱和和导水率的影响上。而对于喀斯特地区的不同干扰方式对坡地土壤饱和和导水率的影响研究相对较少;而且,对于同一地区不同岩性背景条件下(石灰岩和白云岩)的喀斯特坡地土壤导水性能的对比研究还几乎未见报道。

喀斯特山区坡地多以石质或土石质坡地为主,土层浅薄,入渗强烈。石质或土石质喀斯特坡地年均地表径流系数低于 5%,90%以上的降雨通过土壤和表层岩溶带入渗透到地下,表层岩溶带的发育对坡地水分入渗具有重要影响^[10]。但喀斯特地区,地质背景复杂,岩性差异较大,以石灰岩和白云岩为下垫面的喀斯特坡地由于二者矿物组成和风化速率上的差异,导致两类坡地呈现出不同的岩石和土壤组成与结构(岩土组构)特点^[11-12],进而可能对以石灰岩和白云岩为下垫面的两类喀斯特坡地土壤入渗过程及其空间变异性产生影响。

为此,本文根据土地利用类型(林地、灌草地)和人为干扰方式(放牧、未放牧),分别选择以石灰岩和白云岩为下垫面的两类喀斯特坡地开展表层土壤饱和和导水率研究。并结合坡地土壤性质,对比分析两类坡地岩土组构特征、土地利用和人为干扰方式对表层土壤饱和和导水率及其空间变异性的影响,为揭示喀斯特不同岩性背景坡地土壤水分运移规律、水土保持措施以及生态恢复建设提供理论依据和基础数据。

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家寨(地理位置为北纬 26°20′30″—26°21′37″,东经 105°48′36″—105°49′12″)和陈旗流域(北纬 26°15′36″—26°15′56″,东经 105°43′30″—105°44′42″),两地相距 20.5 km。气候条件相同,多年年均降雨量约为 1 300 mm,年平均气温为 14℃。其中,陈家寨所选样地下垫面均为白云岩,地层为三叠系下统第 2 段永宁镇组;陈旗所选样地下垫面均为石灰岩,地层岩性均为三叠系中统第 2 段关岭组。

研究区内农业活动强烈,人为干扰方式除坡耕地外,主要以放牧为主。根据植被覆盖条件和人为干扰方式在陈家寨白云岩坡地选择了白云岩柏树林—灌丛地和白云岩放牧灌草地两类样地。其中,柏树林—灌丛地正处于封山育林恢复期,主要植被为柏树林和低矮灌丛,人为活动干扰程度较小;白云岩放牧灌草地人为干扰严重,样地内有稀疏灌丛分布,以灌草为主,是陈家寨主要放牧地点之一。陈旗流域选择样地为石灰岩常绿落叶阔叶混交林地和石灰岩放牧灌草地。其中,常绿落叶阔叶混交林人为干扰程度小,已封山育林近 20 a,植被覆盖好;石灰岩放牧灌草地人为活动强烈,放牧现象严重,岩石裸露较多(基岩裸露率>50%),植被覆盖条件差,主要为稀疏灌丛和草本植物。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及采样方法 根据地层岩性、植被覆盖条件和人为干扰方式,分别在陈家寨白云岩区域和陈旗石灰岩区域内各选择 2 个坡地作为研究样地。陈家寨 2 个样地分别为柏树林—灌丛地和白云岩放牧灌草地,每个样地内设置 1 个 10 m×10 m 的样方;陈旗 2 个样地分别为常绿落叶阔叶混交林和石灰岩放牧灌草地,其中常绿落叶阔叶混交林样地内设置 4 个 10 m×10 m 的样方,石灰岩放牧灌草地设置 2 个 10 m×10 m 的样方。白云岩坡地土面平整且连续分布,生境类型较单一,全部归为土面,样点选择采用 S 型法则;陈旗小流域样地内生境条件复杂,存在土面、土石面、石沟和石缝等小生境,采样点主要选择所占面积权重比例较大的土面、土石面和石缝 3 类小生境对其表层土壤样品采集并开展入渗试验。土壤样品采集点位于土壤饱和和导水率试验点周边表层土壤(0—15 cm),采样深度与饱和和导水率试验土层深度一致。

1.2.2 土壤性质测定 土壤容重测定采用环刀法^[13]。土壤比重采用比重瓶法^[14]。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 值乘以转化系数(总有机碳与有机质转化系数 1.724)得到土样有机质含量^[15]。土壤粒度分析采用英国马尔文公司 Mastersize 2000 型激光粒度仪测定^[16],土壤粒度分级采用国际制标准。

1.2.3 土壤饱和和导水率测定 土壤饱和和导水率试验采用美国 Guelph 土壤入渗仪。通过 2 次测定水头高度分别为 $H_1=5$ cm, $H_2=10$ cm 的入渗率来计算土壤的饱和和导水率 K_s 值^[17]。计算公式为:

$$K_s = 0.0041 \times X \times R_2 - 0.0054 \times X \times R_1 \quad (1)$$

$$K_s = 0.0041 \times Y \times R_2 - 0.0054 \times Y \times R_1 \quad (2)$$

式中: R_1 ——土壤入渗仪水头(cm); $H_1 = 5$ cm 的水头下降稳定速率; R_2 ——土壤入渗仪水头(cm); $H_2 = 10$ cm 的水头下降稳定速率; $X = 35.22$, 应用外层蓄水罐时的计算参数; $Y = 2.16$, 应用内层蓄水罐时的计算参数。

2 结果与讨论

2.1 石灰岩与白云岩坡地土壤特征

以石灰岩和白云岩为下垫面的两类坡地土壤性质存在较大差异, 表 1 为各样地表层土壤基本性质。

以石灰岩为下垫面的坡地土壤肥沃, 具有较高的有机质含量、孔隙度以及较好的土壤结构。土壤有机

质变化范围为 7.3%~12.0%, 容重变化范围为 0.8~1.0 g/cm³, 孔隙度变化范围为 57.3%~65.9%, 黏粒含量变化范围为 11.4%~16.3%。相比下垫面为石灰岩的坡地土壤, 白云岩坡地土壤, 有机质含量较低(7.1%~10.7%), 土壤容重较大(1.0~1.1 g/cm³), 孔隙度较低(57.1%~62.5%), 砂粒含量较高(29.2%~33.1%)。表明两类坡地土壤性质总体上受控于风化成土过程, 土壤与下伏基岩具有明显的继承关系^[18], 是碳酸盐岩中酸不溶物原地风化残积的产物^[19]。由于石灰岩中方解石矿物颗粒结构致密, 粒间孔隙度小, 溶蚀速率大; 而白云岩主要矿物白云石晶间孔隙分布较均匀, 溶蚀作用以扩散为主, 溶蚀速率较低^[20](为石灰岩的 1/30~1/60)。因此, 风化成土过程中, 白云岩坡地土壤砂粒含量普遍明显高于石灰岩坡地土壤, 土壤熟化程度差。

表 1 不同样地表层土壤理化性质

岩性及均值	观测样地	容重/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/ %	有机质/ %	黏粒 (<0.002 mm)	粉砂 (0.02~0.002 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)
石灰岩	常绿阔叶落叶混交林	0.8	65.9	12.0	11.4	68.8	19.9
	放牧灌草地	1.0	57.3	7.3	16.3	70.0	13.7
	平均值	0.9	61.6	9.7	13.8	69.4	16.8
白云岩	柏树林—灌丛地	1.0	62.5	10.3	14.4	52.6	33.1
	放牧灌草地	1.1	57.1	7.1	16.2	54.6	29.2
	平均值	1.0	59.8	8.7	15.3	53.6	31.1

另外, 土地利用方式的改变对两类坡地土壤性质具有较大影响。由林地转变为放牧灌草地后, 两类石灰岩和白云岩坡地表层土壤容重分别增大了 22.9% 和 12.2%, 黏粒含量分别大增了 43.6% 和 12.7%, 有机质含量分别减少了 39.2% 和 33.5%, 孔隙度分别减少了 13.1% 和 8.6%。长期放牧的影响, 动物踩踏作用强烈, 导致坡地植被遭受破坏, 植被覆盖度降低, 凋落物减少。

同时, 坡地表层土壤性质也随之发生变化, 坡地土壤退化, 土壤有机质含量降低, 表层土壤总孔隙度减少, 容重增大。另外, 随着植被覆盖度的减少, 阳光直接照射到地表, 净辐射或净有效能减少, 导致昼夜

温差大, 土体板结, 土壤结构遭到破坏, 紧实度增强^[21]。

此外, 在非喀斯特地区, 放牧导致了水蚀作用增强, 细颗粒物流失, 坡地土壤易砂化^[22]。但在喀斯特地区坡地土壤流失量低, 细颗粒物发生局部搬运, 可能填入土壤孔隙, 导致黏粒含量增加。因此, 两类喀斯特坡地由林地转变为放牧灌草地后, 表层土壤均呈现出相似的变化趋势, 容重和黏粒含量增加、孔隙度和有机质含量减小。

2.2 石灰岩与白云岩坡地土壤饱和导水率

不同岩性和土地利用方式导致喀斯特坡地表层土壤饱和导水率呈现较大差异(表 2)。

表 2 石灰岩与白云岩坡地表层土壤饱和导水率

岩性	观测样地	放牧程度	饱和导水率/ (mm·h ⁻¹)	采样点数	标准偏差/ (mm·h ⁻¹)	变异系数/ %
石灰岩	常绿落叶阔叶混交林	轻度	328.6	38	298.0	90.7
	放牧灌草地	重度	157.3	21	150.4	95.6
白云岩	柏树林—灌丛地	轻度	257.2	9	153.3	59.6
	放牧灌草地	重度	34.1	10	23.0	67.4

由于喀斯特坡地表层岩溶带的发育,总体上,覆盖于表层岩溶带上方的两类坡地土壤饱和和导水率均较高,变化范围分别为 157.3~328.6 和 34.1~257.2 mm/h(表 2)。但两类坡地不同的岩土结构特征,也导致了两类坡地土壤饱和和导水率存在差异。白云岩矿物孔隙分布较均匀,在构造应力作用下,表层岩溶带易产生均匀且密集的裂隙,裂隙张开度小,溶蚀作用形成类似海绵状的微溶孔,成为地下水良好的存储和运移空间。同时,土壤中由于含有较高砂粒和碎石含量(表 1),也有利于土壤水分入渗^[23]。而石灰岩结构致密,粒间孔隙度小,溶蚀作用过程中,受到各种构造应力作用易产生不均匀分布的张性节理裂隙,裂隙的开度较大,降雨主要通过土壤与岩石突变接触的岩土界面向地下运移^[24]。因此,石灰岩坡地土壤饱和和导水率高于白云岩坡地。

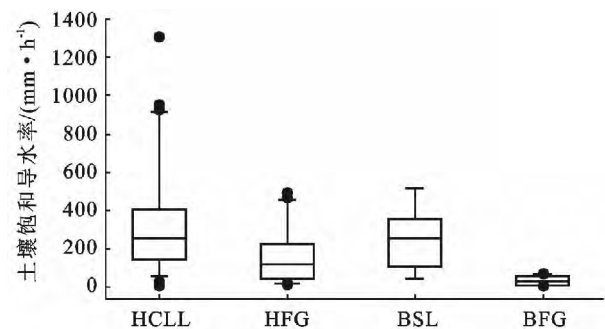
从空间变异性来看,两类坡地对应土壤饱和和导水率的变异系数差别较大,石灰岩坡地表层土壤饱和和导水率的空间变异性要显著高于白云岩坡地(表 2)。石灰岩土壤饱和和导水率的变异系数变化范围是 90.7%~95.6%,白云岩土壤饱和和导水率的变异系数变化范围是 59.6%~67.4%。由于两类坡地岩土结构特征差异,石灰岩坡地土壤被出露基岩分割,导致地表呈现不同类型的地块(如厚层土面覆盖,薄层土面覆盖,土壤充填溶蚀裂隙等)与出露基岩呈斑块状分布特点,异质性强。而白云岩坡地受整体风化作用影响,风化壳剖面往往具有统一的基底,土壤相对连续均匀的分布在地表,因此岩土结构特点相对石灰岩坡地单一,土壤饱和和导水率的变异系数较小。

2.3 土地利用方式对土壤饱和和导水率影响

在林地自然植被条件下,石灰岩和白云岩坡地表层土壤饱和和导水率高, K_s 平均值分别为 328.6 和 257.2 mm/h(表 2)。已有研究表明,森林土壤饱和和导水率普遍高于灌草地,在林地条件下,随着植被覆盖度增加,土壤入渗率呈幂函数增大^[25]。与之相似,良好的喀斯特森林植被覆盖条件,在维持土壤结构和水文功能上发挥着重要的作用。森林植被特别是林地枯落物的分解,可以提高土壤有机质的含量,调控土壤微环境,增加土壤动物和微生物的活动,产生团聚体^[26],从而改善土壤的孔隙状况,提高土壤水分的渗透速度。同时,森林植被根系网络发育广泛,土壤动物活动性强,都有利于土壤大孔隙的形成,增强入渗。因此,在林地自然植被条件下,两类坡地土壤均具有较高的土壤饱和和导水率。

在放牧干扰方式影响下,两类坡地表层土壤饱和和导水率均显著降低(图 1)。白云岩和石灰岩土壤饱

和导水率平均值分别为 34.1 和 157.3 mm/h(表 2),但白云岩坡地饱和和导水率下降程度明显高于石灰岩坡地,降幅分别为 86.7%和 52.1%。造成差异的原因可能与两类坡地的岩土结构特征有关。石灰岩坡地土壤分布不连续,受到出露基岩的分割,易形成土面、土石面、石沟石缝等土体斑块。在某些易受放牧影响的地块(如土面、土石面),受踩踏作用和降雨溅蚀作用影响,土壤退化严重,土体板结,土壤饱和和导水率显著降低;而在某些地块(如石沟和石缝),仍有较好的植被覆盖,降雨或径流仍可通过垂向发育的岩—土界面向垂向方向运移,进入表层岩溶带,因此,在石灰岩放牧坡地,此类地块的饱和和导水率仍能维持在较高水平^[24]。相反,白云岩坡地由于土壤较为均匀地分布于地表,在放牧踩踏和降雨溅蚀作用影响下,坡地表层土壤整体受到影响,表层土壤团聚体破坏,容重、黏粒含量增大,孔隙度、有机质含量减小,饱和和导水率降低。此外,已有研究表明,表层碎石嵌入土壤,将导致土壤孔隙堵塞,减少土壤水分入渗^[27]。白云岩坡地地表分布大量碎石,在踩踏作用下,大量碎石嵌入表层土壤,亦会对降低白云岩坡地土壤饱和和导水率起到一定的作用。



注: HCLL. 石灰岩常绿阔叶混交林; HFG. 石灰岩放牧灌草地; BSL. 白云岩柏树林—灌丛地; BFG. 白云岩放牧灌草地。

图 1 石灰岩与白云岩坡地土壤饱和和导水率对比

3 结论

(1) 以石灰岩和白云岩为下垫面的两类坡地土壤性质存在较大差异。相对白云岩土壤,石灰岩土壤具有较高的有机质含量、孔隙度以及较好的土壤结构,而白云岩土壤养分含量低,砂粒含量较高。当土地利用方式由林地转变为放牧灌草地后,两类坡地表层土壤均呈现容重、黏粒含量增大,孔隙度、有机质含量降低的特点。

(2) 由于喀斯特坡地表层岩溶带的广泛发育,两类岩性的坡地表层土壤饱和和导水率在自然植被条件下均很高,分别为 328.6 和 257.2 mm/h。受到岩土

组构影响,两类坡地表层土壤饱和导水率的变异系数呈现较大差异。石灰岩坡地相比白云岩坡地,其 K_s 具有更高的空间变异性。

(3) 当土地利用方式转变为放牧干扰方式后,两类坡地表层土壤饱和导水率均呈现显著降低趋势。白云岩坡地土壤饱和导水率下降程度明显高于石灰岩坡地,降幅分别为 86.7% 和 52.1%。

[参 考 文 献]

- [1] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- [2] 王小彬,蔡典雄,高绪科,等. 不同农业措施对土壤持水特征的影响及其保水作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1996,2(4):297.
- [3] Pinheiro E F M, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red latosol from Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2004,77(1):79-84.
- [4] Alletto L, Coquet Y. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems [J]. Geoderma, 2009,152(1):85-94.
- [5] 牛海山,李香真. 放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响[J]. 草地学报,1999,7(3):211-216.
- [6] 马履一,翟明普. 京西山地棕壤和淋溶褐土饱和导水率的分析[J]. 林业科学,1999,35(3):109-112.
- [7] 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[J]. 水土保持学报, 2004,18(3):53-56.
- [8] 樊军,邵明安,王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):114-119.
- [9] 廖凯华,徐绍辉,吴吉春,等. 土壤饱和导水率空间预测的不确定性分析[J]. 水科学进展,2012,23(2):200-205.
- [10] Tao Peng, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in Southwest China[J]. Catena, 2012, 90(3):53-62.
- [11] 贾中,喻理飞. 喀斯特石漠化区石灰岩与白云岩土壤理化性质分析:以贵州兴义市为例[J]. 贵州科学,2010, 28(3):29-33.
- [12] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007,35(3):202-206.
- [13] 孔凡伟. 如何精测土壤容重[J]. 黑龙江农业科学,2010 (10):178-178.
- [14] 徐建民,李玲,孟宪毅. 测定矿石粉末密度的简单方法 [J]. 有色金属(选矿部分),1996(4):41-42.
- [15] 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.
- [16] 雷国良,张虎才,张文翔,等. Mastersize 2000 型激光粒度仪分析数据可靠性检验及意义:以洛川剖面 S_4 层古土壤为例[J]. 沉积学报,2006,24(4):531-539.
- [17] 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.
- [18] 王世杰,季宏兵. 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.
- [19] 孙承兴,周德全. 碳酸盐岩酸不溶物作为贵州岩溶区红色风化壳主要物质来源的证据[J]. 矿物学报,2002,22 (3):235-242.
- [20] 刘再华. 外源水对灰岩和白云岩的侵蚀速率野外试验研究[J]. 中国岩溶,2000,19(1):1-4.
- [21] 李胜功,赵哈林,何宗颖. 不同放牧压力下草地微气象的变化与草地荒漠化的发生[J]. 生态学报,1999,19 (5):697-704.
- [22] 闫玉春,唐海萍,张新时,等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠,2010,30(6):1263-1268.
- [23] Bouwer H, Rice R C. Hydraulic Properties of Stony Vadose Zonasa [J]. Groundwater, 1984,22(6):696-705.
- [24] 方胜,彭韬,王世杰,等. 喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究[J]. 地球与环境,2014,42(1):1-10.
- [25] 石生新. 高强度人工降雨条件下影响入渗速率因素的试验研究[J]. 水土保持通报,1992,12(2):49-54.
- [26] Lal R. Tropical ecology and physical edaphology[M]. Chichester etc.: Wiley, 1987.
- [27] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990,15 (7):653-671.