

DOI: 10.5846/stxb201811262569

贾洪杰,甘凤玲,李振轮,黄雪娇,冯密,冯适,毛鑫羽.岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响.生态学报,2019,39(16): - .
Jia H J, Gan F L, Li Z L, Huang X J, Feng M, Feng S, Mao X Y. Effects of rock strata dip on soil physicochemical properties of sloping farmland in a southern karst area. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

岩层倾向对南方喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响

贾洪杰,甘凤玲,李振轮*,黄雪娇,冯密,冯适,毛鑫羽

西南大学资源环境学院,土壤多尺度界面过程与调控重庆重点实验室,重庆 400716

摘要:岩层倾向与不同坡向组合形成了顺向坡和逆向坡的地貌差异,进而影响了土壤中非生物资源的分布。喀斯特地区由于特殊的地质构造,顺向坡和逆向坡分布普遍。本文以重庆市酉阳县泔溪镇的喀斯特槽谷坡耕地为研究区域,研究岩层倾向对喀斯特地区坡耕地土壤理化性质的影响。研究表明,顺向坡表层和下层土壤的自然含水量、饱和含水量、总孔隙度、毛管孔隙度均显著高于逆向坡相应层位,非毛管孔隙度、容重显著低于逆向坡相应层位。顺向坡土壤的 $sa(SiO_2/Al_2O_3)$ 、 $saf(SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3))$ 值显著高于逆向坡,顺向坡淋溶发育程度高于逆向坡。顺向坡土壤表层和下层的有机质、速效钾及碱解氮含量均显著高于逆向坡表层和下层相应含量,而 pH 值和有效磷含量是逆向坡含量较高。顺向坡下层土壤 pH 值和水分含量低于表层,而逆向坡下层土壤 pH 值和水分含量高于表层。综上结果表明,当岩层倾向与坡向相同时,更有利于水分的入渗和保持,促进土壤的淋溶与发育。

关键词:岩层倾向;坡向;坡耕地;土壤理化性质

Effects of rock strata dip on soil physicochemical properties of sloping farmland in a southern karst area

JIA Hongjie, GAN Fengling, LI Zhenlun*, HUANG Xuejiao, FENG Mi, FENG Shi, MAO Xinyu

Chongqing Key Laboratory of soil multi-scale interface process and regulation, Southwestern University, Chongqing 400716, China

Abstract: The geomorphological differences between the bedding rock slope and the anti-dip stratified rock slope, which are formed by the combination of rock strata tendency and slope aspect, affects the distribution of abiotic resources in soil. And there are many bedding rock slopes and anti-dip stratified rock slopes owing to that fold structures are widespread in karst areas. In this work, the karst trough-valley sloping farmland located in Ganxi Town, Youyang County, Chongqing City, was studied to understand the effect of rock stratum tendency on the physical and chemical properties of sloping farmland soil. The results showed that the natural water content, saturated water content, total porosity, and capillary porosity in the surface and the deeper layers soil of the bedding rock slope are significantly higher than those in the corresponding horizons of the anti-dip stratified rock slope, while the non-capillary porosity and bulk density are significantly lower than those of the corresponding horizons in the anti-dip stratified rock slope. The $sa(SiO_2/Al_2O_3)$ and $saf(SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3))$ value of the soil in the bedding rock slope were significantly higher than those in the anti-dip stratified rock slope. So the development degree of leaching in the bedding rock slope was higher than that in the anti-dip stratified rock slope. And the organic matter content, available potassium, and alkali-hydrolyzed nitrogen in the surface and the deeper layers of the bedding rock slope were significantly higher than those of the corresponding horizons in the anti-dip

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502303)

收稿日期:2018-11-26; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhlun4740@sina.com

stratified rock slope, while the pH and available phosphorus were significantly lower than those of the corresponding horizons in the anti-dip stratified rock slope. The pH and water content of the deeper layer in the bedding rock slope were lower than that of the surface layer, while the pH and water content of the deeper layer in the anti-dip stratified rock slope were higher than that of the surface layer. In summary, it is more conducive to the infiltration and maintenance of water when the orientation of rock strata is the same as that of slope aspect, which would be beneficial to soil leaching and development.

Key Words: Rock strata dip; Slope aspect; Sloping farmland; Soil physicochemical properties

我国南方喀斯特地区面积大、分布广、地形条件复杂、水土流失快、裸岩率高、土层浅薄,是典型的脆弱生态系统。同时该地区承载人口多,人为活动强烈,导致石漠化风险极大。为此,恢复和维持该地区的生态环境对我国南方环境生态建设具有重要意义。而土壤理化性质对喀斯特地区生态环境恢复建设起决定性作用^[1-2],因此喀斯特土壤理化性质及其影响因素得到广大研究者的重点关注。

作为土壤重要的基本属性,土壤理化性质受母质、气候、生物、地形、时间等成土五因素和人类活动的显著影响。目前,人们研究了母质类型^[3]、石漠化程度^[4-6]、植被组成^[7]、土地利用方式^[8]、地形以及人为措施^[9]等多方面对喀斯特土壤理化性质的影响。地形因素虽然不直接影响土壤理化性质,但可以通过影响母质、水分、光照、生物等因子的重新分布来影响土壤理化性质。人们发现坡度、坡向、海拔等地形因子对坡地土壤有机质^[10]、土壤酶活性^[11]、土壤含水量^[12]、容重和饱和导水率^[13]等理化性质有显著影响。

从土壤形成的实质来看,土壤理化性质是母质与生物、气候因素以及土体内部所进行的物质与能量的迁移和转化的综合作用的体现,水分运移在这个过程中起至关重要的作用^[14],因此所有影响土表或土壤内部水分运移的因素均会对土壤理化性质产生直接或间接影响。岩层倾向是地形因子之一,也是描述岩层空间位置的岩层产状三要素之一,在不同条件下形成的地形不同,如顺向坡(岩层倾向与坡面倾向一致),逆向坡(岩层倾向与坡面倾向相反),斜向坡(岩层倾向与坡面倾向交叉)等,因此岩层倾向对地面形态及岩石出露有着直接影响^[15]。张志才等^[16-17]研究发现喀斯特峰丛山体出露岩石位置及其破碎程度对不同部位土壤水分含量有显著影响,因此岩层倾向通过影响岩石位置进而影响土壤水分入渗。而土壤水分是土壤中物质运移、转化等重要的影响因素,土壤水分越多、保持时间越久,越有利于土壤中物质的淋溶,从而影响和改变土壤的物理、化学和生物性质。因此不同岩层倾向会影响土壤的水分含量从而影响土壤理化性质的空间变异,然而目前还未见相关研究的报道。本文以重庆酉阳县泔溪镇的典型槽谷区形成的顺逆向坡为研究对象,分析不同岩层倾向下土壤理化学性质的差异,结果表明顺向坡有利于水分入渗和保持,从而促进土壤的淋溶与发育。研究结果为深入理解喀斯特坡耕地土壤肥力形成与恢复提供了较为重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于重庆酉阳县泔溪镇的龙潭槽谷内的和信花椒基地(108°57'E, 29°00'N),龙潭槽谷位于酉阳县桐麻岭背斜的东南翼中,呈东北-西南走向,槽谷两侧岩层倾向一致,坡向相反,出现坡向和岩层倾向一致的顺向坡(位于龙潭槽谷的西侧)、坡向和岩层倾向不一致的逆向坡(位于龙潭槽谷的东侧)。顺向坡坡长约为1000m,坡度为29.6°,土层厚度2080cm,逆向坡坡长约为600m,坡度为58.7°,土层厚度20—100cm,顺向坡土壤岩石裸露率高于逆向坡。花椒基地整体种植青花花椒5年左右,植被以次生灌木、藤本、蕨类以及零稀的乔木为主,原生植被破坏殆尽。桐麻岭背斜轴部以寒武系的白云岩和奥陶系灰岩为主,背斜两翼分别为志留系的砂页岩和二叠、三叠系的灰岩。龙潭槽谷底部宽约1—4km,海拔300—500m,东西两翼山体海拔900—1100m,高差为400—800m。本区属亚热带季风性湿润气候,年降水量为1200mm左右,4—10月降水充沛,其中5—6月、9—10月为降水的集中期,年均气温为14.6℃。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

本实验于 2017 年 6 月进行采样,按坡向和坡位选择长 200m,宽 200m 的正方形作为一个取样区域,在取样区域随机确定 5 个样点,每个点分表层(5—15cm)和下层(20—30cm)取样,每样点上下层分别取样 200 克,5 个样点表层和下层土分别混合作为一个取样区域的表层和下层土壤样品,总计 16 个区域,32 个土壤样品。

1.2.2 样品处理方法

土壤理化性质的测定方法参照杨剑虹主编的《土壤农化分析与环境监测》^[18]。

环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度(孔隙直径小于或等于 0.1mm)、非毛管孔隙度(孔隙直径大于 0.1mm);烘干法测定样品自然含水量;电极法测定 pH;重铬酸钾法测定土壤有机质;凯氏定氮法测定全氮、扩散法测定碱解氮;全钾、速效钾采用火焰光度法;全磷、有效磷采用硫酸钼锑比色法测定;样品全量 Fe、Al、Si 的消解采用 NaOH 熔融法,然后用 ICP-OES(安捷伦 5110)测定。

以上指标测定时每个土样均做 3 次重复。

1.2.3 数据分析

采用 SPSS 19.0 进行显著性分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 岩层倾向对于土壤物理性质的影响

土壤的物理性状指土壤含水率、土壤容重及土壤孔隙度等,是土壤结构状况、持水能力和保水能力的综合体现。顺向坡表层土壤的自然含水量、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和含水量均显著高于逆向坡表层土壤(表 1)。逆向坡表层和下层的土壤容重、表层非毛管孔隙度均显著高于顺向坡相应层位土壤。逆向坡下层非毛管孔隙度显著低于顺向坡下层。土壤中总孔隙度和毛管孔隙度高,容重小有利于土壤接受营养物质,吸收水分和空气。总体来说,顺向坡和逆向坡土壤物理性质差异显著,顺向坡土壤通透性较好,饱和含水率高,土壤物理性质优于逆向坡。

表 1 岩层倾向对喀斯特坡耕地土壤物理性质的影响

Table 1 Influence of rock tendency on soil physical properties in Karst slope farmland

	NC/%	BD/(g/cm ³)	tP/%	CP/%	NP/%	SC/%
ASS	19.63±2.34b	1.33±0.10a	50.80±2.10b	45.80±3.45b	4.28±0.57b	36.47±6.72b
ASL	22.26±2.87a	1.34±0.15a	50.45±2.74b	45.11±0.35b	4.34±0.42b	35.49±4.87b
BSS	22.27±2.77a	1.14±0.10b	57.18±4.19a	52.21±4.74a	2.43±0.96c	48.64±7.60a
BSL	21.53±2.12ab	1.15±0.10b	56.58±2.35a	48.83±1.49ab	5.51±0.83a	46.78±1.88a

NC:自然含水量 Natural moisture content, BD:土壤容重 Bulk density, tP:总孔隙度 Total porosity, CP:毛管孔隙度 Capillary porosity, NP:非毛管孔隙度 Non capillary porosity, SC:饱和含水率 Saturated water content, ASS:逆向坡表层 Anti-dip stratified rock slope surface, ASL:逆向坡下层 Anti-dip stratified rock slope lower layer, BSS:顺向坡表层 Bedding rock slope surface, BSL:顺向坡下层 Bedding rock slope lower layer; 不同小写字母表示各处理间差异性显著 ($P<0.05$)

2.2 岩层倾向对于土壤化学性质的影响

土壤化学性质深刻影响土壤的供肥能力,是衡量土壤肥力的一个重要指标。顺向坡表层土壤的有机质、速效钾、碱解氮、全氮均显著高于逆向坡表层(表 2)。逆向坡表层和下层的 pH 值显著高于顺向坡相应层位。全磷、全钾在顺向坡和逆向坡之间没有显著差异,但顺向坡表层和下层含量均高于逆向坡相应层位。逆向坡表层和下层有效磷显著高于对应顺向坡的表层和下层。除了有效磷和全钾含量以外,土壤化学性质总体呈现:顺向坡表层>逆向坡表层>顺向坡下层>逆向坡下层,土壤表层>土壤下层的规律。总体来说顺向坡的土壤化学性质显著优于逆向坡。

表 2 岩层倾向对喀斯特坡耕地土壤化学性质的影响

Table 2 Influence of rock tendency on soil chemical properties in Karst slope farmland

	pH	OC/ (g/kg)	TN/ (g/kg)	TP/ (g/kg)	TK/ (g/kg)	AN/ (mg/kg)	AP/ (mg/kg)	AK/ (mg/kg)
ASS	7.58±0.62a	7.28±1.06b	2.65±0.84b	0.73±0.10a	16.81±3.71a	35.01±1.37b	9.67±0.92a	42.25±14.57b
ASL	7.65±0.53a	5.22±0.45c	1.79±0.64b	0.59±0.09a	12.47±4.46b	21.59±1.23c	6.21±1.04b	21.75±9.77c
BSS	6.64±0.33b	9.19±1.77a	3.53±0.92a	0.74±0.10a	19.59±2.30a	50.24±3.28a	6.37±1.17b	58.12±17.69a
BSL	6.36±0.60b	6.05±0.85bc	1.98±0.41b	0.63±0.10a	19.63±3.20a	33.93±5.28b	1.67±0.57c	27.25±11.25c

OC:有机质 Organic matter, TN:全氮 Total nitrogen, TP:全磷 Total phosphorus, TK:全钾 Total potassium, AN:碱解氮 Alkaline nitrogen, AP:有效磷 Available phosphorus, AK:速效钾 Available potassium;不同小写字母表示各处理间差异性显著 ($P<0.05$)

2.3 岩层倾向对坡耕土壤淋溶的影响

土壤淋溶是土壤的重要属性之一,深刻影响着土壤的物理化学性质。顺向坡表层和下层土壤全量 Al 含量均高于逆向坡对应的表层和下层,逆向坡表层和下层的 Si 含量显著高于顺向坡对应的表层和下层(表 3)。Fe 含量在顺向坡和逆向坡没有显著差异,但逆向坡表层和下层含量均高于顺向坡对应的表层和下层。Sa ($Sa = SiO_2/Al_2O_3$) 值、Saf ($Saf = SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$) 值是土壤淋溶发育的指标, Sa 值、Saf 值越低,土壤淋溶发育情况越好。上表中可以发现,顺向坡土壤表层和下层的 Sa 值和 Saf 值显著低于逆向坡的表层和下层。因此顺向坡土壤淋溶发育情况要强于逆向坡。

表 3 岩层倾向对喀斯特坡耕地土壤淋溶的影响

Table 3 The influence of rock strata tendency on soil leaching in Karst slope farmland

	Fe/(g/kg)	Si/(g/kg)	Al/(g/kg)	硅铝比 SiO_2/Al_2O_3	硅铝铁比 $SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$
ASS	20.92±1.50a	327.71±31.46a	41.51±3.14b	9.12±1.32a	6.59±0.91a
ASL	22.65±1.46a	335.71±32.47ab	42.18±3.82b	8.98±1.30a	6.38±0.89a
BSS	20.14±1.23a	284.82±15.48c	41.59±1.75b	7.66±0.28b	5.61±0.25b
BSL	21.53±1.33a	305.86±16.30bc	45.44±1.75a	7.62±0.30b	5.62±0.26b

不同小写字母表示各处理间差异性显著 ($P<0.05$)

2.4 逆向坡土壤理化性状之间的相关性分析

逆向坡土壤有机质与饱和含水量呈显著 ($P<0.05$) 负相关关系(表 4)。全氮含量与饱和含水量、总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著 ($P<0.01$) 或显著负相关关系,与土壤容重呈显著正相关关系。有效磷和饱和含水量、总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著正相关关系,与土壤容重呈极显著负相关关系。速效钾与饱和含水量呈极显著正相关关系,与土壤毛管孔隙度呈显著正相关关系。土壤 pH 值与总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著或者显著正相关关系,与自然含水量、饱和含水量、容重、非毛管孔隙度呈极显著或者显著负相关关系。除全磷、全钾和碱解氮以外,有机质、全氮、有效磷、速效钾与土壤饱和含水量均表现出较大的相关性,并且,土壤饱和含水量也深刻的影响着土壤的物理性质,与土壤容重、非毛管孔隙度呈极显著负相关关系,与总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著正相关关系。由此可见,大部分土壤养分含量与土壤的物理性质有极大的相关性,尤其是土壤的饱和含水量,深刻的影响着土壤理化性质。

2.5 顺向坡土壤理化性状之间的相关性分析

顺向坡有机质、速效钾、全磷、全氮含量与自然含水量、饱和含水量、毛管孔隙度呈显著正相关关系(表 5)。有效磷与自然含水量、饱和含水量、毛管孔隙度呈极显著或是显著正相关关系,与非毛管孔隙度呈极显著负相关关系。碱解氮与饱和含水量呈显著正相关关系。pH 值与自然含水量、饱和含水量、容重呈极显著或是显著负相关关系,与总孔隙度和毛管孔隙度呈极显著或是显著正相关关系。除了全钾含量以外,全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、土壤 pH 与饱和含水量、自然含水量有一定的相关性,并且,土壤饱和含水量与土壤容重、非毛管孔隙度呈极显著负相关关系,与总孔隙度、毛管孔隙度、自然含水量呈极显著正相关关系。

表 4 逆向坡土壤理化性状之间相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil physical and chemical properties in anti-dip stratified rock slope

项目 Project	土壤化学性质 Soil chemical properties								土壤物理性质 Soil physical properties				
	OC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	NC	SC	BD	tP	CP
TN	0.678*												
TP	0.313	0.465											
TK	0.046	-0.428	-0.188										
AN	0.744**	0.829**	0.578*	-0.196									
AP	-0.174	-0.665*	-0.155	0.635*	-0.272								
AK	0.055	-0.039	0.173	0.282	0.326	0.512							
pH	-0.781**	-0.887**	-0.166	0.263	-0.697*	0.652*	0.204						
NC	0.303	-0.054	0.113	-0.084	-0.127	0.022	-0.36	-0.86*					
SC	0.638*	-0.711**	0.159	0.486	-0.314	0.876**	0.612**	-0.774**	0.237				
BD	0.311	0.775**	0.224	-0.525	0.451	-0.754**	-0.393	-0.695*	0.082	-0.886**			
tP	-0.146	-0.701*	-0.18	0.518	-0.317	0.849**	0.509	0.646*	0.013	0.930**	-0.949**		
CP	-0.432	-0.631*	-0.127	0.428	-0.265	0.812**	0.631*	0.754**	-0.464	0.953**	-0.781**	0.794**	
NP	0.538	0.405	-0.07	-0.131	0.413	-0.426	-0.401	-0.619*	0.404	-0.559**	0.385	-0.361	-0.686*

** 为 $P<0.01$, 极显著相关; * 为 $P<0.05$, 显著相关

表 5 顺向坡土壤理化性状之间相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil physical and chemical properties in bedding rock slope

项目	土壤化学性质 Soil chemical properties								土壤物理性质 Soil physical properties				
	OC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	NC	SC	BD	tP	CP
TN	0.887*												
TP	0.861*	0.622*											
TK	0.095	-0.14	0.198										
AN	0.754**	0.747**	0.624*	-0.155									
AP	0.897**	0.903**	0.600*	-0.14	0.762**								
AK	0.716*	0.718**	0.617*	0.251	0.635*	0.652*							
pH	-0.741**	0.333	0.191	-0.66	0.399	0.652*	0.276						
NC	0.632*	0.592*	0.614*	0.037	0.311	0.022	0.537*	-0.66*					
SC	0.644*	0.518*	0.720**	0.234	0.528*	0.876**	0.656**	-0.76**	0.772*				
BD	-0.47	-0.426	-0.58	-0.061	-0.499	-0.754**	-0.599*	-0.525*	-0.518	-0.59**			
tP	0.432	0.368	0.41	0.079	0.387	0.849**	0.495	0.57*	0.73**	0.89**	-0.662*		
CP	0.617*	0.506*	0.729**	0.284	0.476	0.812**	0.582*	0.628**	0.797**	0.942**	-0.701**	0.747**	
NP	-0.398	-0.258	-0.582**	-0.372	-0.232	-0.426	-0.256	-0.263	-0.287	-0.363	0.599**	0.121	-0.57*

** 为 $P<0.01$, 极显著相关; * 为 $P<0.05$, 显著相关

3 讨论

3.1 岩层倾向对土壤水分含量的影响

相对于逆向坡而言,山体坡向和岩层倾向一致的顺向坡岩层对土壤阻挡作用小,土壤容易随着径流或者岩层流失,导致顺向坡的岩石裸漏率比逆向坡高,这与实际观测结果相符合。有研究表明,裸岩周围的土壤能够大量吸收和吸附部分降雨,并且裸岩能降低地表的径流速度^[19-20]。降雨期间,雨水降落在裸岩上,降雨资源化程度较高,裸岩改变了降雨的再分配,汇集和补充周边的土壤水分^[21-22]。因此岩层倾向会影响土壤水分的汇聚,使得顺向坡土壤自然含水量和饱和含水量均高于或是显著高于逆向坡,这与游贤慧的研究结果相似^[23]。

3.2 土壤水分含量对土壤物理性质的影响

土壤水分含量作为土壤的本质属性之一,深刻影响着土壤理化性质。研究结构表明,无论在顺向坡还是在逆向坡,土壤自然含水量和饱和含水量与土壤理化性质之间存在着巨大关系。土壤饱和含水量跟土壤容重呈极显著负相关关系,与土壤总孔隙度,毛管孔隙度呈极显著正相关关系,在逆向坡,土壤饱和含水量与土壤非毛管孔隙度呈极显著负相关关系,在顺向坡,土壤饱和含水量与土壤非毛管孔隙度也有一定的负相关关系。这主要是因为本实验区位于岩溶区,土壤母质以石灰岩为主要成分,水分含量高,就将有利于土壤淋溶,从而导致土壤容重减少^[24-25],总孔隙度增加^[26],毛管孔隙度增加,非毛管孔隙度减少。并且,水分含量的多少也将会直接影响到土壤的淋溶发育情况,水分多的土壤淋溶发育状况较好^[27]。

3.3 土壤水分含量对土壤化学性质的影响

本研究的结果显示在顺向坡和逆向坡土壤饱和含水量与土壤有机质含量呈显著正相关关系,与土壤 pH 呈极显著负相关关系,自然含水量与土壤有机质含量呈正相关关系,与土壤 pH 呈显著负相关关系。但是土壤饱和含水量和土壤自然含水量与土壤全量氮、磷、钾,速效氮、磷、钾的含量在顺向坡和逆向坡之间显著性有巨大的差异,或是相关性不大。这主要是因为该试验区为坡耕地,长期大量的使用化肥干扰了土壤中氮磷钾总量。吴军虎^[28]、高鑫宇^[24]的研究都展现了土壤水分对于土壤有机质的影响,即土壤水分含量越高,土壤有机质含量越高,这与本研究的实验结果相同。

3.4 相同坡向不同深度下岩层倾向对土壤理化性质的影响

相同坡向内,逆向坡表层的自然含水量、有机质、全量 K、碱解氮、有效磷、速效钾含量显著高于逆向坡下层。顺向坡表层自然含水量、非毛管孔隙度、有效磷、全 N、碱解氮、速效 K 含量上存在显著高于下层,但下层的 pH 值和水分含量低于表层。按照土壤表面聚集效应,下层的土壤 pH 值和水分含量应该大于表层,然而实验结果却与之相反。前人的研究结果^[29-32]显示岩溶区的土壤存在漏失的情况,主要是因为岩溶区地质构造特殊,岩溶孔隙的存在导致下层土壤的漏失,并且带走了大量的水分和部分土壤淋溶的养分。有效磷来说,是顺向坡土壤的有效磷含量低于逆向坡,这与何园球^[33]的土壤水分含量高,土壤有效磷含量高的研究结果相反,可能是因为顺向坡的水分含量比较高,pH 较低,土壤中的 H^+ 含量比较高,进而土壤淋溶作用强烈。而岩溶区岩石母质的主要成分是碳酸钙,大量的母质溶解会产生更多的 Ca^{2+} 。而 Ca^{2+} (土壤中的全 Ca^{2+} 含量是逆向坡表层和下层含量高于顺向坡相应层数,相关数据未发表)会与土壤中的 PO_4^{3-} 、 H^+ 进一步形成了磷酸氢钙,随地下漏失而流走^[29-32],从而导致了顺向坡土壤中的有效磷含量低于逆向坡。总的来说,岩溶区存在土壤漏失的情况,但有关顺向坡土壤漏失的情况还有待进一步研究。

总体来说,由于岩层倾向与坡向的不同,土壤水分含量在坡面上重新分布,导致了顺向坡土壤水分含量比逆向坡土壤水分含量高,进而影响了土壤的淋溶发育,使得顺向坡土壤的理化性质优于逆向坡。

4 结论

研究表明,顺向坡水分含量高于逆向坡,pH 值低于逆向坡,总孔隙度、毛管孔隙度高于逆向坡。顺向坡土壤淋溶发育情况比逆向坡好,土壤理化性质优于逆向坡。当岩层倾向与坡向相同时,更有利于水分的入渗,促进土壤的淋溶与发育。

参考文献 (References):

- [1] Zhu H H, He X Y, Wang K L, Su Y R, Wu J S. Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a Karst ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 51: 1-7.
- [2] Chang J J, Zhu J X, Xu L, Su H X, Gao Y, Cai X L, Peng T, Wen X F, Zhang J J, He N P. Rational land-use types in the karst regions of China: insights from soil organic matter composition and stability. *Catena*, 2017, 160: 345-353.
- [3] 董玲玲, 何腾兵, 刘元生, 舒英格, 罗海波, 刘方. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析. *土壤通报*, 2008, 39 (3): 471-474.

- [4] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应. 生态学报, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [5] 崔高仰, 容丽, 李晓东, 檀迪. 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1188-1197.
- [6] 李开萍, 刘子琦, 李渊, 肖杰, 董晓超, 曹洋. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征. 水土保持学报, 2017, 31(4): 205-210.
- [7] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 刘洋. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质. 生态学报, 2015, 35(2): 434-448.
- [8] Chen H S, Zhang W, Wang K L, Hou Y. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1086-1093.
- [9] 张伟, 陈洪松, 王克林, 苏以荣, 张继光, 易爱军. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [10] 王霖娇, 李瑞, 盛茂银. 典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性. 生态学报, 2017, 37(5): 1367-1378.
- [11] 罗攀, 陈浩, 肖孔操, 杨利琼, 文丽, 李德军. 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响. 环境科学, 2017, 38(6): 2577-2585.
- [12] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [13] 张川, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 叶莹莹, 王克林. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585-1591.
- [14] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [15] 陈朝镇. 影响岩层露头宽度诸因素的定量与定性分析. 四川地质学报, 1990(04): 285-288.
- [16] 张志才, 陈喜, 石朋, 马建良. 岩石对喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征的影响. 水土保持通报, 2008, 28(6): 41-44.
- [17] 张志才, 陈喜, 刘金涛, 彭韬, 石朋, 严小龙. 喀斯特山体地形对表层岩溶带发育的影响——以陈旗小流域为例. 地球与环境, 2012, 40(2): 137-143.
- [18] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [19] Khelr R B, Abdallah C, Khawliem. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS. *Engineering Geology*, 2008, 99(3-4): 239-254.
- [20] 王济, 蔡雄飞, 雷丽. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟. 中国岩溶, 2010, 29(1): 1-5.
- [21] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶. 黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性. 环境科学, 2017, 38(9): 3860-3870.
- [22] Li S, Ren H D, Li X, Chang J, Yao X H. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the karst rocky desertification regions under drought conditions. *Catena*, 2014, 116.
- [23] 游贤慧, 杨琰, 徐刚. 龙潭喀斯特槽谷倾坡土壤水分变异性研究. 山地学报, 2019, 37(01): 53-61.
- [24] 高鑫宇, 曾奎奎, 吴吉春, 苏辉东, 杜东东, 张兆丰, 金晓蕊. 兰州窦家山典型坡面土壤水分、有机质含量及抗蚀性相关关系研究. 南京大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 185-195.
- [25] Zhang X, Zhao W W, Wang L X, Liu Y X, Liu Y, Feng Q. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 943-954.
- [26] Zhang Q Y, Shao M A, Jia X X, Wei X R. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests. *Geoderma*, 2019, 338: 170-177.
- [27] Gislason S R, Oelkers E H, Eiriksdottir E S, Kardjilov M I, Gisladottir G, Sigfusson B, Snorrason A, Elefsen S, Hardardottir J, Torssander P, Oskarsson N. Direct evidence of the feedback between climate and weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1/2): 213-222.
- [28] 吴军虎, 张铁钢, 赵伟, 李家科, 杨亮. 容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响. 水土保持学报, 2013, 27(3): 63-67, 268-268.
- [29] 魏兴萍, 谢德体, 倪九派, 苏程烜. 重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 462-473.
- [30] Zeng C, Wang S J, Bai X Y, Li Y B, Tian Y C, Li Y, Wu L H, Luo G J. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 2017, 8(4): 721-736.
- [31] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 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. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [32] 魏兴萍. 基于同位素法监测岩溶槽谷区山坡土壤侵蚀和养分流失. 农业工程学报, 2013, 29(22): 128-136.
- [33] 何园球, 樊剑波, 李成亮, 刘晓利, 宋春丽. 水稻旱作下土壤水分状况和施用磷肥对红壤有效磷含量的影响. 土壤学报, 2011, 48(6): 1196-1202.