DOI: 10.5846/stxb201806061277
刘宽梅,周秋文.典型喀斯特森林土壤的抗蚀性.生态学报,2020,40(2):568-577.
Liu K M,Zhou Q W.Study on soil anti-erodibility of typical karst forests.Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):568-577.

典型喀斯特森林土壤的抗蚀性

刘宽梅[1,2],周秋文[1,*]
1 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001
2 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘要:喀斯特地区生态脆弱,极易发生土壤侵蚀。受地表要素空间异质性的影响,目前相关研究仍无法完全反映出喀斯特地区不同植被类型土壤抗蚀性的特征。通过野外调查,了解样地植被群落类型及其组成等基本情况,并以"S 形布点法"实地采样;通过酒精烘烤法、环刀法等方法,获取土壤含水量、土壤容重、土壤有机质、土壤团聚体、土壤微团聚体及土壤机械组成、土壤抗蚀指数等土壤抗蚀指标值。结果表明,除有机质外的其他抗蚀指标表现出 0—10cm 土层内与 10—20cm 土层内的变化规律均和抗蚀指数一致。在土壤深度 0—10cm 范围内,土壤抗蚀指数表征的土壤抗蚀能力强弱为:阔叶林>灌丛>针叶林;在 10—20cm 土层范围为:灌丛>针叶林>阔叶林。0—10cm 土层内各指标表征土壤抗蚀能力的显著程度为:有机质含量、水稳性团聚体、结构破坏率、团聚状况和团聚度较显著,10—20cm 土层内为有机质含量、干筛团聚体、团聚度较为显著,水稳性团聚体次之。通过综合两个土层的情况,可认为有机质含量、水稳性团聚体、团聚度能较好地表征喀斯特林地土壤抗蚀性强弱。在喀斯特地区如果以防治土壤侵蚀为目的,应考虑种植阔叶树种,避免针叶树种。

关键词:林地;植被群落;土壤抗蚀性;喀斯特

Study on soil anti-erodibility of typical karst forests

LIU Kuanmei[1,2], ZHOU Qiuwen[1,*]
1 *School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001, *China*
2 *College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*

Abstract: The karst region is ecologically fragile and is highly prone to soil erosion. Affected by the spatial heterogeneity of surface elements, previous researches can not fully reflect the characteristics of soil erosion resistance of different vegetation types in karst area. Through field investigation, we obtained the basic conditions of the vegetation community types and their composition. And the S-shaped layout method is used for field sampling. The soil anti-erodibility indices were obtained by the alcohol baking method, ring knife method and other methods, including soil water content, soil bulk density, soil organic matter, soil aggregates, soil microaggregates, soil mechanical composition and soil erosion resistance index. Results indicated that soil anti-erodibility indices other than organic matter content reflected the same variation law in 0—10cm soil layer and 10—20cm soil layer, they were consistent with the soil erosion resistance index. In the soil depth of 0—10cm, the soil anti-erodibility characterized by soil erosion resistance index follows the order: broad-leaved forest > bushwood > coniferous forest. In 10—20cm soil layer, the soil anti-erodibility is ranked in order of bushwood > coniferous forest > broad-leaved forest. The indicators that can significantly characterize soil anti-erodibility in 10—20cm are: organic matter content, water-stable agglomerate, structural failure rate, agglomeration condition, and agglomeration degree. While in 10—20cm soil layer, they are organic matter content, dry sieve agglomerate, agglomeration degree, and water-stable

基金项目:国家自然科学基金项目(41761003);贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2019]1433,[2017]1131);贵州省本科教学工程建设项目(2016DC03)
收稿日期:2018-06-06; **网络出版日期**:2019-11-04
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zouqiuwen@163.com

agglomerate. By comprehensive analysis of the two soil layers, organic matter content, water-stable agglomerates, and agglomeration degree can better characterize the anti-erodibility of soil in karst forest land. For the purpose of controlling soil erosion, broad-leaved tree species instead of conifer species should be considered in the karst area.

Key Words: forest land; vegetation community; soil anti-erodibility; karst

土壤是人类和陆地生物赖以生存的物质基础。在成土过程中,生物是其中最活跃的要素,生物中的绿色植物,通过光合作用制造活体有机质,借助微生物作用,让土壤产生了肥力特性,有效推动了土壤的形成和演化[1]。在不同的森林植被群落条件下,土壤发育的理化性质会有所差别,而不同的土壤理化性质对土壤侵蚀的产生与发生强度都有重要影响[2]。土壤侵蚀会带来土壤肥力下降、土地生产力降低、土地荒漠化等危害[3],而土壤抗蚀性是评估土壤抵抗侵蚀营力破坏的性能[4]。

国内外学者对土壤抗蚀性的研究从用单一指标评价演变成多指标综合评价,还从土壤理化性质角度、统计学角度、侵蚀动力学角度、人工模拟法等来探讨土壤抗蚀性能[5-6]。在土壤抗蚀性研究的发展历程中,研究成果越来越全面和丰富,从不同区域、不同土地利用方式、不同植被覆盖、不同岩石风化物、不同土壤类型、不同管理措施、不同侵蚀模式等多方面来研究土壤抗蚀性[7-11]。国内对土壤抗蚀性的研究从 1960 年初开始,研究内容主要集中在分散率、分散系数、侵蚀率和分散度等度量指标[12]。目前我国的土壤抗蚀性研究成果较丰富,尤其对黄土高原地区土壤抗蚀性研究比较全面[13-15]。

贵州喀斯特地区植被覆盖率低、降水量大、土层薄、土壤蓄水性差,极易发生土壤侵蚀[16],植被要素与土壤侵蚀的关系十分密切[17],因此在贵州喀斯特地区开展不同植被群落下的土壤抗蚀性研究内容有重要意义。目前对于贵州喀斯特地区土壤抗蚀性能的研究主要有,赵洋毅等探讨了花溪地区 4 种岩性发育土壤的抗蚀性,并比较了 4 种岩性上发育的自然植被下土壤的抗蚀性差异[18]。吴鹏等研究了黔中杠寨小流域 5 种主要人工林地的水土保持机能[19]。虽然目前针对喀斯特地区不同林地类型的土壤抗蚀性开展了一定研究工作,也取得了一些显著的进展[20-23]。但是喀斯特地区地表要素空间异质性极大,气候、岩性等条件的差异将直接或间接影响土壤抗蚀性。鉴于不同环境条件下喀斯特林地土壤抗蚀性存在明显差异,有限的研究不足以说明喀斯特林地土壤抗蚀性的普遍规律,仍需要开展一定的样地研究。

本研究以贵州师范大学花溪校区内生态实验站内阔叶林、针叶林和灌丛为研究对象,选择土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、团聚度和分散系数等与土壤抗蚀性有关的指标,对比讨论各植被群落下土壤抗蚀性能的差别,并采用相关分析法,分析该区域中各土壤抗蚀性指标间的相关性及其相互影响下的土壤抗蚀性能,望为贵州喀斯特地区制定合理的水土保持方案提供一定的理论依据。

1　研究方法

1.1　研究区概况

试验样地位于贵州省花溪区,地理坐标为 106°37′58″—106°38′26″E,26°22′51″—26°23′20″N,属中亚热带湿润季风气候区,平均海拔 1200m,年平均气温 14.9℃,无霜期平均 246d,无霜期长,全年降雨多集中于 4—8 月份,年均降雨量约为 1229mm,雨量充沛。境内地貌破碎,以山地和丘陵为主,为典型的亚热带喀斯特区域。该研究区内有针叶林、阔叶林和灌丛三种植被型组,乔木平均胸径为 15cm,郁闭度为 0.85,土壤以黄壤和石灰土为主。

1.2　样地设置

为了减少地域差异(如降水量、温度和气候等因素)对结果产生的影响,不同植被类型的样地均设置在花溪大学城贵州师范大学生态实验站内。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic profile of the sample plots

样地类型 Sample plots	坡度 Gradient/(°)	主要植被 Main vegetation
阔叶林 Broad-leaved forest	12	珊瑚朴、云南樟、麻栎、女贞、盐肤木、冬青、香叶树、圆果化香等
针叶林 Coniferous forest	20	马尾松
灌丛 Bushwood	26	蕨类、杜鹃、火棘、小果蔷薇、马桑、竹叶椒、野茼蒿、蝴蝶花、狗尾草等

图 1 采样实地照片

Fig.1 Photographs of the samples

1.3 样品的采集

每种植被群落样地中选取 3 个点,每个样点重复采样三次,在 0—10cm 和 10—20cm 土层内,用环刀取原状土,用于测定土壤容重、含水量等性质;在每种样地中以 S 形布点法分别取 0—10cm 土层和 10—20cm 土层的混合土样,然后用四分法将土样分取到大约 1kg 带回实验室风干备用,用于土壤抗蚀指数、土壤机械组成、土壤有机质和土壤团聚体等指标的测定。

1.4 样品的测定

1.4.1 分析方法

土壤含水量测定采用酒精烘烤法;土壤容重测定采用环刀法;土壤有机质测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法;土壤团聚体测定采用人工筛分法(干筛法和湿筛法);土壤微团聚体及土壤机械组成的测定采用比重法;土壤抗蚀指数的测定采用土粒浸水实验,其过程为:先将土壤样品风干、筛分;再将筛分后 3—6mm 粒径的土壤颗粒数 100 粒,分四次放入盛水容器中的 1mm 土壤筛上进行实验,水温以实验地水源为准,水恰好浸没土粒,同时记录每 1 分钟土粒完全散开而崩塌的个数,持续记录 10 分钟,然后按公式计算抗蚀指数。

1.4.2 评价指标

土壤抗蚀性是一个由多个指标共同作用的综合因子,单一指标只能揭示土壤对侵蚀营力的相对敏感水平[24]。因此,只能在一定的控制条件下通过实际测定土壤某些参数作为土壤抗蚀性指标, 继而达到评估土壤抗蚀性的目的。本实验采用以下常用指标综合评价土壤抗蚀性:

$$S = \frac{(W - V)}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中,S 为土壤抗蚀指数(%);W 为总土粒数(个);V 为崩塌土粒数(个)。

$$O = \frac{\frac{0.8000 \times 5.00}{V_1} \times (V_1 - V_2) \times 0.003 \times 1.724 \times 1.1}{WT} \times 100\% \quad (2)$$

式中,O 为土壤有机质含量(%);V_1 为滴定空白时所用 $FeSO_4$ 的量(mL);V_2 为滴定土样时所用 $FeSO_4$ 的量

(mL);5.00 为所用 $K_2Cr_2O_7$的量(mL);0.8000 为 1/6$K_2Cr_2O_7$标准溶液的浓度(mol/L);0.003 为 1/4 毫摩尔碳的克数(g);1.724 为碳转化为有机质的系数;1.1 为校正系数;*WT* 为烘干土重(g)。

$$A_d = \frac{m_d}{M_d} \times 100\% \tag{3}$$

式中,A_d为>0.25mm 干筛团聚体含量(%);m_d为干筛各级团粒质量(g);M_d为干筛试验土样总质量(g)。

$$A_w = \frac{m_w}{M_w} \times 100\% \tag{4}$$

式中,A_w为>0.25mm 水稳性团聚体含量(%);m_w为湿筛各级团粒质量(g);M_w湿筛试验土样总质量(g)。

$$S_t = \frac{A_d - A_w}{A_d} \times 100\% \tag{5}$$

式中 S_t为结构破坏率,A_d,A_w含义同上。

$$R = a - b \tag{6}$$

式中,R 为土壤团聚状况(%);a 为>0.05mm 微团聚体分析值(%);b 为>0.05mm 机械组成分析值(%)。

$$R_1 = \frac{R}{a} \times 100\% \tag{7}$$

式中,R_1为团聚度(%),R,a 含义同上。

$$K_1 = \frac{a_1}{b_1} \times 100\% \tag{8}$$

式中,K_1为分散率(%);a_1为<0.05mm 微团聚体分析值(%);b_1为<0.05mm 机械组成分析值(%)。

$$K_2 = \frac{a_2}{b_2} \times 100\% \tag{9}$$

式中,K_2为分散系数(%);a_2为<0.001mm 微团聚体分析值(%);b_2为 0.001mm 机械组成分析值(%)。

1.5　数据处理方法

一般的数据整理、各个指标的具体计算、统计图表作图均在 Excel 中进行,土壤抗蚀指标间的相关分析采用 SPSS 软件进行处理。

2　结果与分析

2.1　土壤抗蚀指数

由图 2 可知,三种植被群落下的土壤抗蚀性有所差别,但三种植被类型下的土壤抗蚀指数都比较高,反映出植被覆盖对缓解土壤侵蚀的重要作用。在 0—10cm 范围内,土壤抗蚀性强弱表现为:阔叶林>灌丛>针叶林。阔叶林表层植物种类多样且覆盖度高,枯枝落叶等物质较多,腐殖质含量高,同时能够充分利用外界环境条件和树种间相互促进的有利作用产生含量较高的有机胶体,从而促成土壤团粒结构的构成,使土层更疏松,透水性增强[25-26]。而灌丛和针叶林表层下枯枝落叶种类和数量较阔叶林少,在生物作用下产生的土壤团聚力较弱,所以土壤抗蚀能力弱于阔叶林。在 10—20cm 范围内,土壤抗蚀性强弱表现为:灌丛>针叶林>阔叶林。阔叶林内木本植物群落下的腐殖质会从表层土壤向下层急剧减少[1],影响下层土壤胶体的形成,进而影响土壤团粒结构的形成。根据图 3 所示,针叶林表层的容重在三者中是最低的,说明针叶林表层土壤土质疏松,有机质通过淋溶等作用向下淀积到下层内,为形成较好的土壤结构提供条件,因此下层土壤抗蚀性能有所改善。灌丛下层土壤样品质地粘重,有机质含量高,不易被侵蚀[27]。因此针叶林下层的土壤抗蚀性能高于阔叶林,但灌丛下层土壤的抗蚀性较另外两者高。

2.2　有机质含量

如图 4 所示,在 0—20cm 土层范围内,三种植被群落下土壤有机质含量随土层深度增加都呈递减趋势。在阔叶林下 0—10cm 土层中有机质含量最高,但在 10—20cm 土层中下降趋势明显,相比下降 36.13%。这主

要是因为阔叶林中植物种类多样,表层生物量流动大,物质循环较快,枯落物容易分解转化,致形成含量较高的土壤活性有机质[25],但喀斯特地区土层较薄,下层生物活动量锐减,枯落物在表层大部分就已经被分解,土壤肥力较表层差,所以产生的有机质下降趋势明显。草本植物以枯残根系进入土体上部,腐殖质自表层向下不会锐减,所以灌丛在该范围内有机质下降趋势比较平缓,说明该植被群落下受有机质影响的土壤抗蚀性比较稳定。针叶林表层容重值小,说明土壤土质疏松,有机质通过淋溶等作用向下淀积,加上 10—20cm 土层原有的有机质,所以在 10—20cm 土层中针叶林有机质含量比阔叶林和针叶林高。

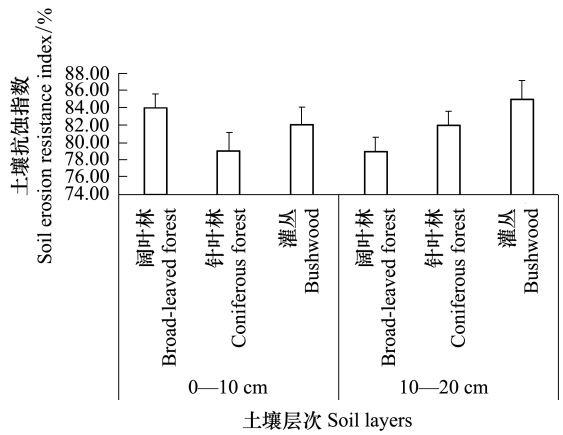

图 2 不同植被群落的土壤抗蚀指数

Fig.2 Soil erosion resistance inhex in different vegetation communities

超出图例符号的垂直棒代表平均值的标准误差

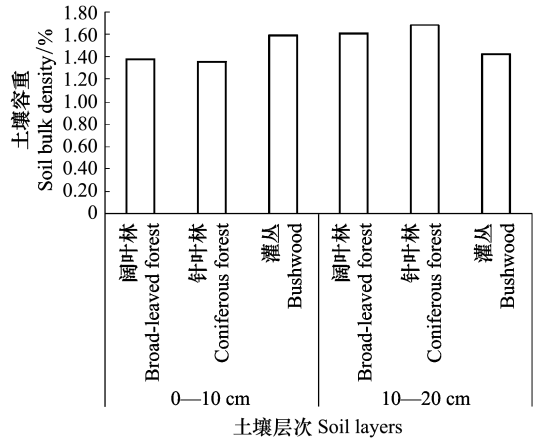

图 3 不同植被群落下土壤容重

Fig.3 Soil bulk density under different vegetation communities

2.3 土壤团聚体

2.3.1 干筛团聚体含量

由表 2 可知,三种植被类型下的土壤团聚体结构组成多以>3mm 以上为主。在 0—10cm 土层内,阔叶林土壤中 > 3mm 的土壤团聚体含量较针叶林和灌丛高 29.96%和 9.75%,灌丛土壤下>3mm 粒级的土壤团聚体含量比纯针叶林高出 5.41%,针叶林土壤下的>3mm 的土壤团聚体含量所占比例最低。在 10—20cm 土层内,灌丛土壤下>3mm 粒级的土壤团聚体含量明显高于其他两种植被类型,但针叶林土壤中>3mm 的土壤团聚体含量略高于阔叶林。>0.25mm 干筛团聚体含量的排序为:在土壤表层内,阔叶林(94.93%)>灌丛(94.75%)>针叶林(89.34%);在 10—20cm 土层内,灌丛(94.04%)>针叶林(94.01%)>阔叶林(92.42%)。这些在一定程度上反映出阔叶林对改善表层土壤结构的优势,对增强喀斯特地区的土壤抗蚀性十分有用,另一方面也反映出喀斯特地区的纯针叶林表层土壤团聚体容易受外界条件影响而分散,阔叶林 10—20cm 土层内土壤团聚性能较差,表明喀斯特地区生态环境的脆弱性,以及保护植被的重要性。

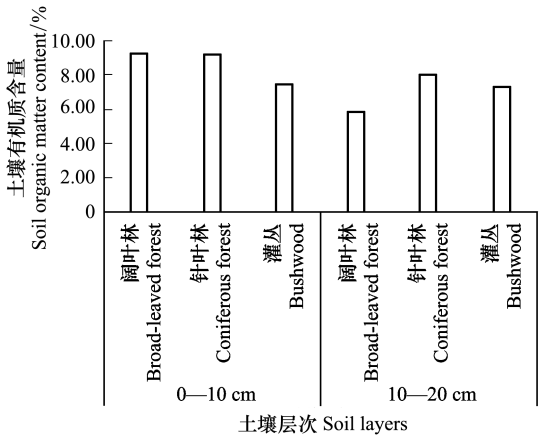

图 4 不同植被群落下土壤有机质含量

Fig.4 Soil organic matter content in different vegetation communities

2.3.2　水稳性团聚体含量和结构破坏率

由表 3 可知,三种植被类型土壤中>0.25mm 水稳性团聚体的含量为:0—10cm 土层内,阔叶林(70.06%)>灌丛(65.96%)>针叶林(60.83%);10—20cm 土层内,灌丛(66.76%)>针叶林(64.25%)>阔叶林(10.21%)。阔叶林表层枯枝落叶物多,腐殖质的含量高,植被类型多样,生物活动丰富,有机质含量丰富[25],所以阔叶林表层土壤的水稳性团聚体含量占优势。相比之下,针叶林内植被类型单一,且上层土壤疏松,有机质等营养物质通过淋溶作用向下淀积,所以针叶林土壤下的水稳性团聚体在 10—20cm 土层比较占优势。灌丛下土壤的有机质虽然不多,但其本身黏性很强,所以该种植被类型下的土壤水稳性团聚体含量并不低。通常情况下,用土壤水稳性团聚体含量和有机质含量作为评价土壤的抗蚀性指标时,两者之间的变化规律应基本一致[28]。但是土壤团聚体的形成是一个非常复杂的过程,受物理、化学、生物作用的共同影响[29],胶结物质在团聚体形成的过程中也起着非常重要的作用,但是胶结物质可以是无机的、有机的或有机无机结合的,无机胶结物质主要受成土母质影响,有机胶结物质的形成主要受微生物数量、活性及其代谢产物和植物根系分泌物,有机质的输入等因素控制[30],所以该样地内的土壤水稳性团聚体变化与土壤有机质变化不太一致很大程度上是受这些因素影响。结构破坏率的大小表示土壤抗蚀能力的强弱,此样地中结构破坏率的变化规律与>0.25mm 水稳性团聚体含量的变化规律一致。

表 2　不同植被群落下土壤团聚体(干筛)组成/%

Table 2　Composition of soil aggregates in different vegetation communities (dry screening)

植被类型 Vegetation types	土壤层次 Soil layers/cm	>5mm	5—3mm	3—2mm	2—1mm	1—0.5mm	0.5—0.25mm	>0.25mm
阔叶林	0—10	15.93	33.15	8.72	19.98	8.01	9.15	94.93
Broad-leaved forest	10—20	8.00	21.70	12.63	33.55	8.01	8.55	92.42
针叶林	0—10	4.93	14.19	7.78	32.26	14.46	15.74	89.34
Coniferous forest	10—20	9.00	21.34	10.44	33.67	9.20	10.37	94.01
灌丛 Bushwood	0—10	11.46	27.87	12.52	30.39	8.94	3.57	94.75
	10—20	16.00	27.78	8.61	28.68	7.01	5.97	94.04

表 3　不同植被群落下水稳性团聚体组成(/%)和结构破坏率(/%)

Table 3　Composition of water stable aggregates and structural failure rate in different vegetation communities

植被类型 Vegetation types	土壤层次 Soil layers/cm	>5mm	5—3mm	3—2mm	2—1mm	1—0.5mm	0.5—0.25mm	>0.25mm	结构破坏率 Structural failure rate/%
阔叶林	0—10	12.52	14.06	9.83	15.00	8.83	9.82	70.06	26.19
Broad-leaved forest	10—20	5.79	17.92	11.41	8.60	7.77	10.21	61.71	33.23
针叶林	0—10	0.90	13.97	8.21	13.39	11.28	13.06	60.83	31.92
Coniferous forest	10—20	4.06	16.51	10.52	11.41	10.07	11.68	64.25	31.65
灌丛 Bushwood	0—10	9.51	29.62	12.33	3.57	5.19	5.74	65.96	30.38
	10—20	13.79	21.87	7.85	9.00	7.21	7.04	66.76	29.01

2.4　土壤机械组成及微团聚体对抗蚀性的影响

2.4.1　土壤机械组成分析

由表 4 可知,样地内土壤机械组成差异比较大,0—10cm 土层内:阔叶林下土壤以物理性粘粒(<0.01mm)和中细粉粒(0.01—0.001mm)为主,其含量分别占 52.41%和 31.01%;针叶林以沙粒(1—0.05mm)和物理性黏粒(<0.01mm)为主,其含量分别占 29.41%和 48.61%;灌丛以沙粒(1—0.05mm)和物理性黏粒(<0.01mm)为主,其含量分别占 47.41%和 43.61%。在 10—20 cm 土层内:针叶林和灌丛土壤的机械组成分布特征与表层一致,但是阔叶林土壤以沙粒(1—0.05mm)和物理性黏粒(<0.01mm)为主。表层土壤内针叶林和灌丛土壤的沙粒比重高,主要是由于土体中夹着很多岩石碎屑,这会导致土壤蓄水蓄肥性不好,所以在这三种植被类型

下,阔叶林表层的蓄水保肥能力是最好的,自然植被生长优势较大,其土壤抗蚀性能也是最强的。

表 4 不同植被群落下土壤机械组成状况

Table 4 Soil mechanical composition in different vegetation communities

植被类型 Vegetation types	土壤层次 Soil layers/cm	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%				
		沙粒 (1—0.05mm) Grit	粗粉粒 (0.05—0.01mm) Coarse dust	物理性黏粒 (<0.01mm) Physical clay	中细粉粒 (0.01—0.001mm) Medium fine powder	黏粒 (<0.001mm) Cosmid
阔叶林	0—10	24.60	22.98	52.41	31.01	26.00
Broad-leaved forest	10—20	30.61	23.98	45.41	28.01	22.00
针叶林	0—10	29.41	21.98	48.61	27.01	27.00
Coniferous forest	10—20	33.21	17.98	48.81	32.81	21.00
灌丛 Bushwood	0—10	46.01	10.98	43.01	14.00	30.00
	10—20	47.41	8.98	43.61	14.00	31.00

2.4.2 以微团聚体含量为基础的土壤抗蚀性指标

由表 5 可知,不同植被类型 0—10cm 土壤的团聚状况排序为:阔叶林(34.09%)>灌丛(24.21%)>针叶林(14.94%);10—20cm 土壤的团聚状况排序为:灌丛(39.61%)>针叶林(27.50%)>阔叶林(22.09%)。团聚度的变化特征与团聚状况一致。从团聚状况可以看出阔叶林土壤表层结构明显优于另外两种,团聚度较针叶林和灌丛土壤表层高 24.39%和 23.61%,但下层结构差,一旦表层遭到破坏,对下层的影响很大。如表 5 所示,0—10cm 土层内,阔叶林土壤的分散率低于针叶林和灌丛土壤分散率,但灌丛土壤分散率较针叶林下土壤分散率低 23.67%,表明在阔叶林下表层土具有较强的抗蚀性,灌草地次之,针叶林最弱;在 10—20cm 土层内,土壤抗蚀性强弱为:灌丛(24.71%)>针叶林(58.84%)>阔叶林(68.17%)。

表 5 不同植被群落下土壤团聚状况、团聚度、分散率、分散系数

Table 5 Soil agglomeration status, soil agglomeration degree, soil dispersion rate and soil dispersion coefficient in different vegetation communities

植被类型 Vegetation types	土壤层次 Soil layers/cm	团聚状况 Soil agglomeration status%	团聚度 Soil agglomeration degree/%	分散率 Soil dispersion rate /%	分散系数 Soil dispersion coefficient /%
阔叶林	0—10	34.09	58.10	54.80	51.28
Broad-leaved forest	10—20	22.09	41.94	68.17	90.91
针叶林	0—10	14.94	33.71	78.84	55.56
Coniferous forest	10—20	27.50	45.32	58.84	79.37
灌丛 Bushwood	0—10	24.21	34.49	55.17	55.56
	10—20	39.61	45.53	24.71	64.52

2.5 抗蚀指标间的相关性分析

对土壤有机质含量、团聚体含量、水稳性团聚体含量、结构破坏率、团聚状况、团聚度、分散率、分散系数等 8 个因子进行主成分分析发现:有机质含量在土壤表层和 10—20cm 土层的贡献率最大,分别为 75.073%和 86.024%,因此用团聚体含量和有机质含量之间的相关性分析对各抗蚀指标间的关系进行检验。由表 6 可以得出,在 0—10cm 土层范围内,水稳性团聚体较干筛团聚体占优势,有机质含量与水稳性团聚体呈显著正相关关系,相关系数为 0.977,土壤中水稳性团聚体含量会随着有机质含量的增加而增加,水稳性团聚体在水中浸湿后稳定性比较高,不容易解体,在喀斯特区,降雨量大且土层薄,土壤易遭水流侵蚀,通过改善植被状况来增加土壤有机质含量,从而增加土壤水稳性团聚体含量来达到提高土壤抗蚀性的目的[1]。结构破坏率、分散系数和有机质含量、水稳性团聚体的相关系数分别为-0.994、-0.931 和-0.947、-0.832,呈负相关关系;团聚

状况和团聚度和有机质含量、水稳性团聚体的相关系数分别为 0.991、0.941 和 0.997、0.847,呈正相关关系,表明结构破坏率、团聚状况亦可用于评价该区表土土壤抗蚀性能。

表 6　0—10cm 土层土壤抗蚀指标的相关性分析

Table 6　Correlation analysis of soil erosion resistance index in 0—10cm soil layer

土壤抗蚀指标 Soil erosion resistance indices	有机质含量 Soil organic content	干筛团聚体含量 Soil aggregate	水稳性团聚体含量 Water stable aggregate	结构破坏率 Structural failure rate	团聚状况 Soil agglomeration status	团聚度 Soil agglomeration degree	分散率 Soil dispersion rate
干筛团聚体含量 Soil aggregates	0.798	1.000					
水稳性团聚体含量 Water stable aggregatesn	0.977	0.909	1.000				
结构破坏率 Structural failure rate	−0.994	−0.727	−0.947	1.000			
团聚度 Soil agglomeration degree	0.941	0.548	0.847	−0.973	0.888	1.000	
分散率 Soil dispersion rate	−0.789	−1.000**	−0.902	0.717	−0.864	−0.536	1.000
分散系数 Soil dispersion coefficient	−0.931	−0.524	−0.832	0.966	−0.875	−1.000*	0.512

**. 在 0.01 水平上显著相关; *. 在 0.05 水平上显著相关

在 10—20cm 土层范围内,干筛团聚体较水稳性团聚体占优势,降水时靠土壤的下渗能力可以减少水蚀力。在 10—20cm 土层中,大团聚体越多,土壤间的空隙越大越有利于渗水。由表 7 可知,有机质含量与干筛团聚体的相关系数呈正相关关系,系数为 0.94。在 10—20cm 土层内,团聚度来表征土壤抗蚀性能比较明显,其与有机质和干筛团聚体含量的相关系数分别为 0.927 和 0.999,呈正相关关系。

表 7　10—20cm 土层土壤抗蚀指标的相关性分析

Table 7　Correlation analysis of soil erosion resistance index in 10—20cm soil layer

土壤抗蚀指标 Soil ersion resistance indices	有机质含量 Soil organic content	干筛团聚体含量 Soil aggregate	水稳性团聚体含量 Water stable aggregate	结构破坏率 Structural failure rate	团聚状况 Soil agglomeration status	团聚度 Soil agglomeration degree	分散率 Soil dispersion rate
干筛团聚体含量 Soil aggregates	0.940	1.000					
水稳性团聚体含量 Water stable aggregatesn	0.658	0.876	1.000				
结构破坏率 Structural failure rate	−0.540	−0.795	−0.989	1.000			
团聚状况 Soil agglomeration status	0.478	0.749	0.976	−0.997*	1.000		
团聚度 Soil agglomeration degree	0.927	0.999*	0.893	−0.816	0.772	1.000	
分散率 Soil dispersion rate	−0.387	−0.678	−0.949	0.985	−0.995	−0.704	1.000
分散系数 Soil dispersion coefficient	−0.600	−0.837	−0.997*	0.997*	−0.989	−0.856	0.970

*. 在 0.05 水平上显著相关

3　讨论

3.1　不同区域林下土壤抗蚀性的差异

土壤抗蚀性影响因素较多,不同区域在地形、岩性、气候、植被等条件均有差异,导致不同区域林下土壤抗

蚀性可能存在差别。由于土壤抗蚀性这一概念在国内应用较多,国外应用较少,因此国外的研究中很少涉及土壤抗蚀性,国内开展的不同植被类型土壤抗蚀性的研究也很少出现在国外期刊上。Zheng 等人的研究表明,杉木林和桉树林下土壤的抗蚀性高于茶园、枇杷园和撂荒地[31]。刘旦旦等在黄土残塬沟壑区的研究结果表明,林地土壤抗蚀性最高,荒草地次之,农耕地土壤抗蚀性最差[32]。黄土丘陵沟壑区的研究结果表明,撂荒后植被从一年生草本群落阶段演替到多年生蒿禾类草本群落阶段的过程中,土壤的级配状况在不断改良,颗粒分形维数增大,团粒结构有所改善,土壤团粒结构的分形维数与结构体破坏率均不断减小,稳定性不断增强,从而提高了土壤的抗蚀性[33]。上述研究结果都表明,林地下的土壤抗蚀性高于灌木、草地,或者高级植被群落下土壤的抗蚀性高于低级群落。本研究中将土壤抗蚀性分为两层分析,考虑到土壤侵蚀首先发生在表层,因此将本研究中 0—10cm 层的研究结果与上述研究结果进行比较。结果表明,土壤表层的抗蚀性为阔叶林>灌丛>针叶林,除针叶林外,本研究的结果与上述其他研究结果是基本一致的。

李阳芳等在云南元阳梯田区的研究结果表明,荒草地的抗蚀性最好,灌木林地次之,有林地,坡耕地最差;>3mm 的土壤团聚体含量、3—2mm 的土壤结构水稳度、<0.05mm 的土壤分散率、土壤的团聚状况、植物根系含量 5 个指标可以较全面地反映出元阳梯田区土壤的抗蚀性能[34]。吴胡强等在安徽省岳西县的研究表明,土壤抗蚀性强弱表现为马尾松林大于桑树林[35]。南方红壤区的研究表明,土壤抗蚀性强弱的排序为灌木林>松树林>材用竹林>经济林>茶园,结构性颗粒指数、土壤团聚度和土壤结构体破坏率等指标能够很好地衡量土壤抗蚀性强弱[36]。上述研究结果表明,排除人类直接干扰的用地类型外,总体上荒草地土壤抗蚀性最好,灌木林地次之,林地抗蚀性最差。这些结果与前述的研究结果以及与本研究的结果是相反的。这进一步说明土壤抗蚀性的影响因素较多,植被类型并不是决定土壤抗蚀性强弱的唯一因素,需要综合考虑成土母质、气候、物种等因素。

3.2 喀斯特地区林下土壤抗蚀性的差异

如前所述,土壤抗蚀性的影响因素众多,即使是同为喀斯特地区,不同地区、不同自然条件下开展的研究结果仍可能存在一定差异。陈佳等在桂西北喀斯特地区的研究表明,土壤抗蚀性强弱顺序为:原生林>次生林>撂荒地>坡耕地>人工林[21]。蒋丽伟等在花江峡谷示范区的研究表明,土壤抗蚀性在退耕香椿林>退耕撂荒地>退耕油桐林>退耕车桑子地>退耕花椒地>耕地[20]。李会等在普定陈旗流域的研究结果表明,不同土地利用方式土壤的抗蚀性大小顺序为,灌草地>稀疏灌丛地>火烧迹地>复合植被>幼林地>坡耕地[23]。王佩将等在贵州省大方县桶井石漠化综合治理示范区的研究结果表明,土壤抗蚀性大小排序为灌草丛> 乔灌过渡林 > 灌木林> 乔木疏林> 人工林> 草坡> 坡耕地。喀斯特山区,坡耕地土壤抗蚀性能最差; 植被恢复过程中,土壤的抗蚀性能先逐渐变好,后逐渐变差,转折点在灌草阶段[22]。上述研究虽然同在喀斯特地区开展,但是研究结果有的表明植被演替阶段越高级,土壤抗蚀性越强;有的研究结果表明,土壤抗蚀性强弱并非与植被演替阶段同向发展,而是存在转折。

总体而言,本研究的结果表明在上层土壤中阔叶林的土壤抗蚀性大于灌木林,而针叶林的土壤抗蚀性最低。上述研究表明,喀斯特地区的土壤抗蚀性存在明显的空间异质性,受自然条件变化的影响很大。中国西南喀斯特地区覆盖范围较广,降水、气温等气候因素区域差异大,会直接或间接地影响土壤属性,从而影响土壤抗蚀性;岩性条件的差异也是造成喀斯特地区土壤抗蚀性差异的重要原因。喀斯特地区主要岩石类型有石灰岩、白云岩,而不同地层的石灰岩、白云岩其纯度、物质组成、夹非碳酸盐岩的状况都有差异,这将直接影响成土母质,从而影响土壤抗蚀性。此外,中国西南喀斯特地区地表破碎、土层薄,土壤属性在微观尺度上也存在显著差异,加上不同研究树种、树龄选择的差异,都可能造成同样是在中国西南喀斯特地区开展的研究,但不同植被类型下土壤可蚀性的差异较大。上述情况进一步说明,为弄清喀斯特地区不同植被下土壤可蚀性的特征,已有研究仍然显得不足,需要在不同的地貌、岩性、气候条件、植被类型区域开展更多的相关研究。

4 结论

通过对实验样地中三种植被群落下 0—10cm 和 10—20cm 土层土壤的抗蚀性指标进行评价,发现除有机

质指标外,其余指标的变化特征均一致。土壤 0—10cm 层的抗蚀性:阔叶林>灌丛>针叶林;土壤 10—20cm 层的抗蚀性:灌丛>针叶林>阔叶林。通过综合两个土层土壤抗蚀性指标的情况,可认为有机质含量、水稳性团聚体、团聚度能较好地表征喀斯特林地土壤抗蚀性强弱。鉴于阔叶林的表层土壤抗蚀性高于灌丛和针叶林,而表层土壤是最先受到土壤侵蚀影响的层次,在喀斯特地区的植被恢复、生态重建、水土保持等工作中,如果以防治土壤侵蚀为目的,应考虑种植阔叶树种,避免针叶树种。此外,相关研究结果对于指导水土保持实践的区域差异与局限性也应予以重视。

参考文献(References):

[1] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 田连恕, 张建明. 自然地理学(第四版). 北京: 高等教育出版社, 2008: 332-333.

[2] Breshears D D, Whicker J J, Johansen M P, Pinder J E. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: quantifying dominance of horizontal wind-driven transport. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(11): 1189-1209.

[3] 李睿康, 李阳兵, 文雯, 周亚琳, 梁鑫源, 刘雁慧. 1988—2015 年三峡库区典型流域土壤侵蚀强度时空变化——以大宁河流域和梅溪河流域为例. 生态学报, 2018, 38(17): 6243-6257.

[4] 赵洋毅, 周运超, 段旭. 黔中喀斯特地区不同岩性土壤的抗蚀抗冲性研究. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9311-9313, 9317-9317.

[5] Wang Z H, Fang H, Chen M H. Effects of root exudates of woody species on the soil anti-erodibility in the rhizosphere in a karst region, China. PeerJ, 2017, 5: e3029.

[6] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态. 水土保持科技情报, 2001, (1): 36-39.

[7] Moosdorf N, Cohen S, von Hagke C. A global erodibility index to represent sediment production potential of different rock types. Applied Geography, 2018, 101: 36-44.

[8] Evans R, Collins A L, Zhang Y, Foster I D L, Boardman J, Sint H, Lee M R F, Griffith B A. A comparison of conventional and ^{137}Cs-based estimates of soil erosion rates on arable and grassland across lowland England and Wales. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 49-64.

[9] Vanwalleghem T, Gómez J A, Infante Amate J, González de Molina M, Vanderlinden K, Guzmán G, Laguna A, Giráldez J V. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. Anthropocene, 2017, 17: 13-29.

[10] Wang L H, Wang Y F, Saskia K, Artemi C, Ma B, Wu F Q. Effect of soil management on soil erosion on sloping farmland during crop growth stages under a large-scale rainfall simulation experiment. Journal of Arid Land, 2018, 10(6): 921-931.

[11] Shen H O, Wen L L, He Y F, Hu W, Li H L, Che X C, Li X. Rainfall and inflow effects on soil erosion for hillslopes dominated by sheet erosion or rill erosion in the Chinese Mollisol region. Journal of Mountain Science, 2018, 15(10): 2182-2191.

[12] 周运超, 周习会, 周玮. 贵州岩溶土壤形成及其可持续利用. 山地农业生物学报, 2005, 24(5): 419-425.

[13] 董晓辉, 刘林, 李金峰, 杜俊杰, 王鹏飞, 张建成. 黄土高原丘陵沟壑区经济作物欧李的水土保持功能. 水土保持通报, 2016, 36(5): 242-247.

[14] 王文艳, 张丽萍, 刘俏, 钱婧, 连琳琳. 黄土中主要矿物构成对土壤抗蚀性的影响及空间变异. 水土保持学报, 2013, 27(4): 7-11.

[15] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 于洋, 殷哲. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述. 生态学报, 2017, 37(14): 4905-4912.

[16] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[17] Cotler H, Ortega-Larrocea M P. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico. CATENA, 2006, 65(2): 107-117.

[18] 赵洋毅, 周运超, 段旭, 周玮. 黔中喀斯特地区不同植被土壤抗蚀性研究. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 633-636.

[19] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 丁访军, 周玮. 黔中杜寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 64-70.

[20] 蒋丽伟, 唐夫凯, 崔明, 方健梅. 典型岩溶区不同退耕模式土壤抗蚀性差异及其评价. 林业资源管理, 2014, (3): 56-61.

[21] 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 王克林, 张伟. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 105-110.

[22] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 程富东. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化. 土壤学报, 2014, 51(4): 806-815.

[23] 李会, 周运超, 刘娟, 李玲. 喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 16-23.

[24] 阮伏水, 吴雄海. 关于土壤可蚀性指标的讨论. 水土保持通报, 1996, 16(6): 68-72.

[25] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 鹿天阁. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究. 应用生态学报, 2000, 11(3): 345-348.

[26] 姜爱国, 万福绪, 胡菲. 南京紫金山灵谷寺不同林地土壤抗蚀性研究. 水土保持研究, 2018, 25(1): 12-16.

[27] 黄会前, 何腾兵, 牟力. 贵州母岩(母质)对土壤类型及分布的影响. 浙江农业科学, 2016, 57(11): 1816-1820.

[28] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 范冰, 陈文德. 不同草本层三倍体毛白杨林地土壤抗蚀性研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 70-74, 79-79.

[29] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.

[30] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4/5): 665-676.

[31] Zheng Z C, He S Q, Li T X. Fractal dimensions of soil structure and soil anti-erodibility under different land use patterns. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(24): 5496-5504.

[32] 刘旦旦, 张鹏辉, 王健, 肖庆利. 黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比. 林业科学, 2013, 49(9): 102-106.

[33] 严方晨, 焦菊英, 曹斌挺, 于卫洁, 魏艳红, 寇萌, 胡澍. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性——以坊塌流域为例. 应用生态学报, 2016, 27(1): 64-72.

[34] 李阳芳, 宋维峰, 和弦, 和俊, 彭永刚, 赵子蛟. 元阳梯田区不同土地利用类型表层土壤抗蚀性研究. 生态科学, 2014, 33(5): 926-930.

[35] 吴胡强, 张雅坤, 张金池, 张水锋, 邵永昌, 庄家尧. 上舍流域两种林地土壤结构与抗蚀性. 水土保持通报, 2015, 35(1): 9-13.

[36] 邱陆旸, 张丽萍, 陆芳春, 连琳琳, 刘俏. 基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析. 水土保持学报, 2016, 30(4): 74-79.