

网络出版时间:2022-09-06 13:42
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220905.1755.003.html

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.03.006

典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性研究

张 军^{1,2}, 谢旭姣^{1,2}, 韦小茶^{1,2}, 李 青^{1,2}, 王 济^{1,2}, 张 帅^{1,2}

(1 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;
2 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550025)

[摘 要] **【目的】**研究典型喀斯特地区不同龄级马尾松林下土壤抗蚀性,筛选表征喀斯特地区马尾松林土壤的最适抗蚀指标,为喀斯特地区水土保持和生态可持续发展提供理论支持。**【方法】**在贵州省贵阳市花溪区选择不同龄级(幼龄林(SY)、中龄林(SZ)、成熟林(SC))的马尾松林,测定了不同龄级马尾松林土壤基本理化性质、团聚体组含量、机械组成和土壤抗蚀性指标,最后选取有机质含量、抗蚀指数、团聚体破坏率、团聚状况、团聚度、分散率、分散系数、湿筛平均重量直径、湿筛平均几何直径、体积质量、干筛团聚体含量、水稳性团聚体含量、毛管持水量 13 个指标,采用主成分分析方法探究各龄级马尾松林土壤的最优抗蚀指标和综合抗蚀指数。**【结果】**(1)不同龄级马尾松林土壤理化性质存在明显差异,其中土壤平均有机质含量由大到小排序为成熟林(94.49 g/kg)>中龄林(63.78 g/kg)>幼龄林(55.29 g/kg)。(2)马尾松林土壤湿筛平均重量直径、团聚状况和水稳性团聚体含量均随土层深度的增加而下降,表现为成熟林>中龄林>幼龄林。(3)主成分分析发现,有机质、水稳性团聚体含量、抗蚀指数、团聚度、团聚状况和湿筛平均重量直径为最适抗蚀指标。(4)不同龄级马尾松林综合抗蚀指数表现为成熟林(8.04)>中龄林(-0.29)>幼龄林(-7.75)。**【结论】**筛选出了表征喀斯特地区马尾松林土壤抗蚀性的最适指标。随着喀斯特地区马尾松林龄的增加,土壤有机质、湿筛平均重量直径和水稳性团聚体含量均增大,团聚状况得到改善,土壤抗蚀性增强。

[关键词] 马尾松林;土壤抗蚀性;喀斯特地区

[中图分类号] S157.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2023)03-0051-11

Soil anti-erodibility under *Pinus massoniana* forest at different ages in typical Karst area

ZHANG Jun^{1,2}, XIE Xujiao^{1,2}, WEI Xiaocha^{1,2}, LI Qing^{1,2},
WANG Ji^{1,2}, ZHANG Shuai^{1,2}

(1 College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China;
2 State Key Laboratory Breeding Base for Karst Mountain Eco-Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: **【Objective】** The soil anti-erodibility of *Pinus massoniana* forests at different ages in typical Karst areas was studied and the optimal anti-erodibility indexes were selected to provide support for soil and water conservation and ecological sustainable development in Karst areas. **【Method】** *Pinus massoniana* forests with different ages (young forest (SY), half-mature forest (SZ) and mature forest (SC)) were selected in Huaxi District, Guiyang, Guizhou Province. Basic physical and chemical properties, aggregate group contents, mechanical composition and anti-erodibility indexes of *Pinus massoniana* forests at different ages were measured. Then, 13 indexes including organic matter content, anti-erodibility index, percentage of

[收稿日期] 2022-03-16
[基金项目] 国家自然科学基金项目(41807336);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y189,黔科合 LH 字[2017]7345 号,黔科合平台人才[2018]576919);贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目;贵州省世界一流学科建设计划项目;喀斯特生态环境学科群(黔数科研发[2019]125 号)
[作者简介] 张 军(1993—),男,贵州铜仁人,硕士,主要从事环境生态学与环境毒理学研究。E-mail:1049646324@qq.com
[通信作者] 张 帅(1984—),男,河北唐山人,副教授,博士,主要从事环境地球化学与环境毒理学研究。E-mail:ka-kui@163.com

aggregate destruction, aggregation condition, degree of aggregation, dispersity, dispersion coefficient, wet sieve average weight diameter, geometric mean diameter of wet sieve, volume mass, aggregate content of dry sieve, water stable aggregate content and capillary water holding capacity were selected, and principal component analysis was used to explore the optimal soil anti-erodibility indexes and comprehensive anti-erodibility index of *Pinus massoniana* forests at different ages. 【Result】 (1) There were significant differences in soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* forests at different ages, and average soil organic matter content was in the order of mature forest (94.49 g/kg) > half-mature forest (63.78 g/kg) > young forest (55.29 g/kg). (2) The wet sieve average weight diameter, aggregation condition and water stable aggregate content of soil under *Pinus massoniana* forests decreased with the deepening of soil layer, and they were in order of mature forest > half-mature forest > young forest. (3) Principal component analysis showed that organic matter content, water stable aggregate content, anti-erodibility index, degree of aggregation, aggregation condition and wet sieve average weight diameter were optimal soil anti-erodibility indexes. (4) The comprehensive anti-erodibility index of *Pinus massoniana* forests of different ages was in the order of mature forest (8.04) > half-mature forest (-0.29) > young forest (-7.75). 【Conclusion】 The optimal indexes of soil anti-erodibility of *Pinus massoniana* forests in Karst areas were selected. With the increase of forest age, soil organic matter, wet sieve average weight diameter and water stable aggregate content increased, the aggregation condition improved, and the soil anti-erodibility was enhanced.

Key words: *Pinus massoniana* forest; soil anti-erodibility; Karst areas

土壤侵蚀会导致土壤退化, 制约农业发展, 是世界性环境问题^[1]。中国西南喀斯特地区是世界主要岩溶集中区中最大的岩溶区之一。受独特的地质条件影响, 该区域土壤的结构稳定性、保肥保水和抗侵蚀能力弱^[2], 再加上陡坡耕作、乱砍滥伐等不合理土地利用方式的影响, 出现了植被破坏、水土流失和土地生产力下降的问题^[3], 最终导致该区域出现严重的石漠化现象^[4]。土壤抗蚀性是土壤抗水分散和悬浮的能力, 是评估土壤抵抗侵蚀的重要指标之一^[5-6]。喀斯特地区独特的环境条件导致该区土壤抗蚀性与非喀斯特地区存在显著差异^[7], 因此研究喀斯特地区土壤抗蚀性对该区域生态可持续发展具有重要意义。

土壤抗蚀性不仅与土壤自身因素相关, 还受植被类型、地形和降雨等外部因素的影响^[8]。由于喀斯特地区自身环境的特殊性和复杂性, 其土壤抗蚀性表现出不同特征^[9]。研究表明, 喀斯特地区土壤浅薄, 有机质和阳离子交换量低, 土壤粒径、持水率和团聚体等因素均会影响土壤抗蚀性^[10]。在环境的演化过程中, 土壤体积质量、有机质和土壤养分会影响土壤的理化性质^[11], 进而影响土壤抗蚀性。过去诸多学者从植被类型、根系、土地利用、林龄和有机碳等方面对土壤的抗蚀性进行了研究^[12-16], 并取得了一定成果^[17-19], 但当前对喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性研究仍较少。马尾松(*Pinus*

massoniana)在我国分布极为广泛, 其天然林面积占马尾松林总面积的 69.37%, 是喀斯特地区造林的主要树种^[20]。由于自然和人为因素的影响, 马尾松的生态功能和结构等会出现问题^[21], 马尾松林地容易发生水土流失和生态退化^[22]。此外, 在喀斯特区域发展林下经济成为一种新的开发模式^[23-24], 而不合理开发容易造成土壤侵蚀。因此, 仍需对喀斯特地区马尾松林地土壤抗蚀性进行研究, 以揭示其变化规律。为此, 本研究以贵州省贵阳市花溪区不同龄级的马尾松林为对象, 以土壤有机质、团聚体、分散系数、平均重量直径等为土壤抗蚀指标, 采用主成分分析法探究各龄级马尾松林下土壤的最优抗蚀指标和综合抗蚀指数, 以期对喀斯特地区的水土保持和生态可持续发展工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于贵州省贵阳市花溪区, 地理坐标为 26°22'32"~26°23'25"N, 106°37'41"~106°38'52"E, 该区域位于珠江水系和长江水系分水岭处, 平均海拔为 1 190 m, 属于亚热带湿润季风气候区, 年平均气温 15℃, 无霜期 240 d, 年平均降雨量 1 230 mm。该区域以白云岩和石灰岩组成的山地丘陵为主, 属于典型的亚热带喀斯特区域, 土壤类型主要为石灰土。

1.2 样地设置

通过前期野外调查,筛选出具有代表性的马尾松成熟林(SC)、中龄林(SZ)和幼龄林(SY),其基本

概况如表 1 所示。采用“S 形布点法”进行布点,在每种马尾松林中采集 5 个点,每个点重复采样 3 次,分别采集 0~10,10~20,20~30 cm 土层土样。

表 1 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林的基本概况

Table 1 A general survey of <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas						
类型 Type	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	林龄/a Age	平均树高/m Average tree	郁闭度/% Crown density	林下主要植被 Main understory vegetation
成熟林 SC	15	1 187	39	20	82	圆果化香、麻栗、苔草 <i>Platycarya longipes</i> Wu, <i>Quercus acutissima</i> Carruth, <i>Carex tristachya</i>
中龄林 SZ	28	1 207	22	12	79	圆果化香、月月青、麻栗 <i>Platycarya longipes</i> Wu, <i>Itea ilicifolia</i> Oliv, <i>Quercus acutissima</i> Carruth
幼龄林 SY	31	1 211	11	5	71	麻栗、女贞、圆果化香 <i>Quercus acutissima</i> Carruth, <i>Ligustrum lucidum</i> , <i>Platycarya longipes</i> Wu

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤基本理化性质 采用硫酸-重铬酸钾外加热法(LY/T 1237-1999)测定土壤有机质含量,采用电位法测定 pH。参考文献[25],采用环刀法(LY/T 1215-1999)测定土壤孔隙度(毛细孔隙度和非毛细孔隙度)、土壤含水率、体积质量和毛管持水量。

1.3.2 土壤团聚体组含量和机械组成 采用国家农业标准(NY/T 1121.3-2006),测定不同粒径(>5,>3~5,>2~3,>1~2,>0.5~1,>0.25~0.5 mm)团聚体(干筛团聚体和水稳性团聚体)含量以及土壤机械组成(黏粒(<0.001 mm)、中细粉粒(0.001~<0.01 mm)、粗粉粒(0.01~<0.05 mm)、砂粒(0.05~<1 mm))。

1.3.3 土壤抗蚀性指标 目前团聚度、分散率、团聚状况、分散系数、团聚体破坏率、抗蚀指数、湿筛平均重量直径、湿筛平均几何直径 8 个指标广泛用于评价土壤的抗蚀性,其测定和计算方法见文献[26-27]。

1.4 数据处理与主成分分析

试验数据处理和各个指标计算均在 Excel 中进

行,用 Origin2018 制图,在 SPSS 22 软件中进行主成分分析。将所有可供选择的抗蚀指标通过逐步加入或剔除,本研究最终确定进行主成分分析的 13 个指标:有机质含量(X_1)、抗蚀指数(X_2)、团聚体破坏率(X_3)、团聚状况(X_4)、团聚度(X_5)、分散率(X_6)、分散系数(X_7)、湿筛平均重量直径(X_8)、湿筛几何平均直径(X_9)、体积质量(X_{10})、干筛团聚体含量(X_{11})、水稳性团聚体含量(X_{12})、毛管持水量(X_{13})。对 13 个抗蚀指标进行主成分分析^[28]时,首先计算每个主成分标准化系数矩阵中各主成分的载荷值、特征值及得分系数,然后分别建立 0~10,10~20,20~30 cm 土层土壤抗蚀指数的回归方程,最后将 0~10,10~20,20~30 cm 土层中同一龄级的得分相加,可得到不同龄级马尾松林各土层的土壤综合抗蚀指数。

2 结果与分析

2.1 不同龄级马尾松林土壤的基本理化性质

典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的基本理化性质见表 2。

表 2 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的基本理化性质

Table 2 Physicochemical characteristics of soils at different ages in <i>Pinus massoniana</i> forests in typical Karst areas									
类型 Type	土层/cm Sampling depth	pH	有机质含量/ (g·kg ⁻¹) Organic matter content	土壤含水率/% Natural water rate	体积质量/ (g·cm ⁻³) Volume mass	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Noncapillary porosity	毛管持水量/% Capillary water holding capacity	
成熟林 SC	0~10	6.83±0.17 b	130.33±7.71 a	10.82±0.25 c	0.77±0.08 a	52.70±1.27 a	18.27±1.01 b	29.95±1.98 a	
	10~20	6.26±0.01 b	90.45±8.06 a	11.68±0.21 b	0.95±0.03 a	51.93±0.98 a	12.35±0.53 b	26.82±1.44 a	
	20~30	6.56±0.06 b	62.68±7.78 a	5.11±0.01 c	1.33±0.07 a	43.06±1.04 a	6.83±0.48 c	18.58±1.70 b	
中龄林 SZ	0~10	7.76±0.12 a	85.12±0.71 b	19.09±0.12 a	0.77±0.04 a	50.67±0.77 a	20.18±0.52 a	28.75±0.52 a	
	10~20	7.66±0.07 a	59.18±2.05 b	15.87±0.12 a	0.89±0.06 a	49.71±0.99 a	18.62±0.55 a	27.17±1.54 a	
	20~30	7.63±0.18 a	47.03±0.21 b	15.31±0.21 a	1.02±0.08 b	45.68±1.45 a	15.88±0.46 a	22.74±1.94 a	
幼龄林 SY	0~10	7.93±0.18 a	74.38±1.77 c	13.90±0.10 b	0.85±0.06 a	50.95±0.70 a	17.09±0.46 b	27.74±1.11 a	
	10~20	7.68±0.05 a	53.88±1.83 c	13.93±0.22 a	0.96±0.07 a	49.76±0.54 a	14.06±0.54 b	25.53±0.50 a	
	20~30	7.95±0.22 a	37.63±0.71 c	12.03±0.06 b	1.01±0.05 b	48.55±1.05 a	13.45±0.58 b	24.31±1.92 a	

注:同列数据后标不同小写字母表示同一土层不同龄级间差异显著($P<0.05$)。表 3 和表 4 同。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference among age groups in same soil layer ($P<0.05$). The same in Table 3 and Table 4.

如表 2 所示,不同龄级马尾松林土壤 pH 为 6.26~7.95,3 种龄级马尾松林土壤 pH 由小到大表现为成熟林<中龄林<幼龄林。土壤有机质含量都随着土层深度的增加而减小,不同龄级马尾松林土壤平均有机质含量由大到小表现为成熟林(94.49 g/kg)>中龄林(63.78 g/kg)>幼龄林(55.29 g/kg)。马尾松林土壤的体积质量随着土层深度的增加而增大,而土壤的毛管持水量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度随着土层深度的增加而减小。以上结果表明,随着马尾松林的发育土壤有机质含量增加,土壤 pH 值下降,表层土壤孔隙度得到改善。

2.2 不同龄级马尾松林土壤团聚体含量

典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤干筛团聚体和水稳性团聚体含量见图 1。由图 1 可知,在 3 种龄级马尾松林下,粒径>0.25 mm 土壤干筛团聚

体平均含量表现为中龄林(95.39%)>成熟林(95.13%)>幼龄林(91.90%)。除了幼龄马尾松林外,其他 2 种马尾松林中粒径>0.25 mm 土壤干筛团聚体含量随着土层深度的增加而增加。各龄级马尾松林土壤中主要以粒径>3 mm 干筛团聚体为主,且粒径>3 mm 干筛团聚体的含量都随树龄的增加而增大。在 3 种龄级马尾松林土壤水稳性团聚体中,以粒径>3 mm 团聚体为主,且粒径>0.25 mm 土壤水稳性团聚体平均含量表现为成熟林(79.94%)>中龄林(76.17%)>幼龄林(72.35%)。在同一龄级马尾松林下,粒径>0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量随着土层深度的增加而下降。以上结果表明,随着马尾松林龄的增加,水稳性团聚体含量增多,土壤抗蚀性增强。因此水稳性团聚体含量较好地反映了土壤的抗蚀性。

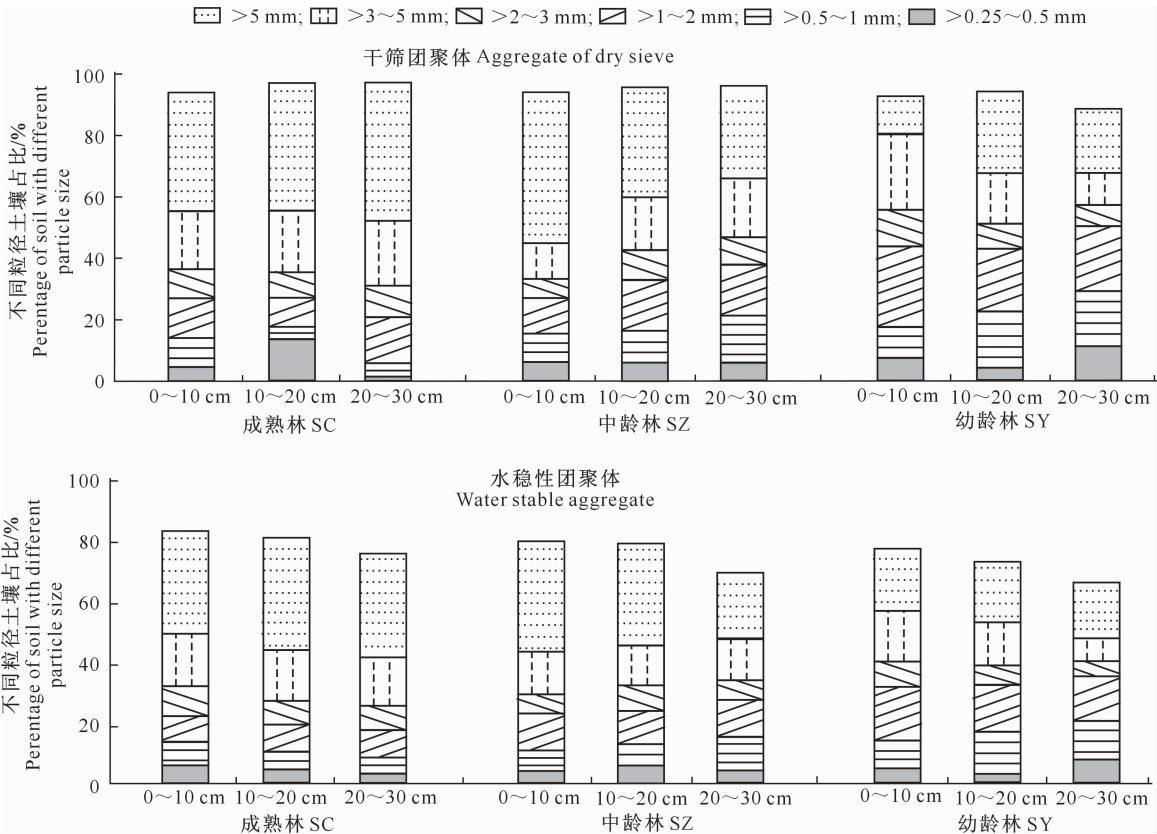


图 1 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林不同粒径土壤干筛团聚体和水稳性团聚体含量

Fig. 1 Contents of aggregates of dry sieve and water stable aggregate with different grain sizes of *Pinus massoniana* forests at different ages in typical Karst areas

2.3 不同龄级马尾松林土壤的机械组成

如表 3 所示,在 3 种龄级马尾松林下,土壤均以黏粒(<0.001 mm)和粗粉粒(0.01~<0.05 mm)为主。各龄级黏粒(<0.001 mm)平均含量由大到小顺序为幼龄林(55.28%)>中龄林(50.21%)>成

熟林(31.48%);除成熟林外,其他 2 种林下土壤黏粒(<0.001 mm)都随着土层深度的增加而增大。土壤粗粉粒(0.01~<0.05 mm)平均含量由大到小表现为成熟林(28.77%)>中龄林(23.79%)>幼龄林(18.90%);在同一龄级马尾松林下,随着土层深

度的增加粗粉粒含量下降。以上结果表明,0~10 cm 土层黏粒含量低,粗粉粒含量高,而 20~30 cm 土层黏粒含量高,粗粉粒含量低。这是由于表层土

壤有机质含量高,土壤颗粒易胶结,土壤团聚体粒径增大,而 20~30 cm 土层则反之。

表 3 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的机械组成

Table 3 Soil mechanical composition of <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas						%
类型 Type	土层/cm Sample depth	黏粒(<0.001 mm) Cosmid	中细粉粒 (0.001~<0.01 mm) Medium fine powder	粗粉粒 (0.01~<0.05 mm) Coarse dust	砂粒 (0.05~<1 mm) Grit	
成熟林 SC	0~10	29.31±1.00 b	16.75±0.82 a	29.31±0.78 a	24.63±1.30 a	
	10~20	26.49±0.70 c	22.41±0.70 a	28.53±1.06 a	22.57±0.91 a	
	20~30	38.65±1.27 c	12.21±0.40 a	28.48±1.03 a	20.67±1.22 a	
中龄林 SZ	0~10	45.86±1.15 a	12.51±0.69 b	25.01±0.59 b	16.62±0.75 b	
	10~20	48.39±1.04 b	10.08±0.60 b	24.20±0.73 b	17.33±1.01 b	
	20~30	56.38±1.11 b	8.05±0.55 c	22.15±0.21 b	13.42±1.20 b	
幼龄林 SY	0~10	47.11±0.91 a	14.34±0.88 ab	20.48±0.68 c	18.08±0.81 b	
	10~20	58.60±0.74 a	10.10±0.59 b	18.19±0.72 c	13.11±1.05 c	
	20~30	60.15±1.46 a	10.02±0.24 b	18.04±0.46 c	11.78±0.78 b	

2.4 不同龄级马尾松林土壤的抗蚀性指标

如表 4 所示,不同龄级马尾松林土壤抗蚀性具有明显差异。在同一龄级马尾松林下,团聚度、抗蚀指数和团聚状况都随着土层深度的增加而下降。在 0~10 cm 土层,团聚度由大到小排序为成熟林(30.85%)>中龄林(28.36%)>幼林龄(26.34%)

10~20 cm 与 20~30 cm 土层团聚度变化特征总体与 0~10 cm 土层一致。随着马尾松林的发育,土壤分散率、分散系数和团聚体破坏率都整体减小,在垂直方向上表现为随着土层深度的增加而增大,土壤水稳性团聚体和抗蚀指数的变化规律则反之。

表 4 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的抗蚀性指标

Table 4 Soil erosion resistance indices of <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas					
类型 Type	土层/cm Sample depth	团聚度/% Degree of aggregation	分散率/% Dispersity	团聚状况/% Aggregation condition	分散系数/% Dispersion coefficient
成熟林 SC	0~10	30.85±1.05 a	20.14±0.79 c	28.55±0.91 a	15.85±0.78 b
	10~20	28.90±1.13 a	35.56±1.06 b	25.20±0.29 a	27.81±0.67 b
	20~30	25.70±0.49 a	44.75±1.30 b	21.10±0.32 a	33.32±0.73 a
中龄林 SZ	0~10	28.36±0.54 ab	38.69±0.77 b	23.75±0.85 b	21.99±1.72 a
	10~20	24.79±1.23 b	50.12±1.00 a	19.85±0.97 b	28.29±0.51 b
	20~30	24.25±1.04 a	56.25±0.75 a	18.25±0.67 b	34.20±0.76 a
幼龄林 SY	0~10	26.34±0.94 b	44.17±0.86 a	21.45±0.28 b	22.71±1.14 a
	10~20	25.29±1.05 b	52.67±1.40 a	19.05±0.75 b	30.52±1.08 a
	20~30	22.49±0.67 a	60.33±0.93 a	16.25±0.25 b	37.96±1.26 a
类型 Type	土层/cm Sample depth	团聚体破坏率/% Percentage of aggregate destruction	抗蚀指数/% Anti-erodibility index	湿筛平均重量直径/mm Wet sieve average weight diameter	湿筛几何平均直径/mm Geometric mean diameter of wet sieve
成熟林 SC	0~10	11.63±0.51 b	82.86±2.08 a	2.93±0.09 a	1.23±0.08 a
	10~20	15.05±0.91 b	79.43±3.60 a	2.91±0.03 a	1.86±0.06 a
	20~30	21.11±0.16 b	51.86±3.95 a	2.74±0.09 a	1.57±0.11 a
中龄林 SZ	0~10	15.42±0.28 a	83.14±2.81 a	2.79±0.19 a	1.36±0.13 a
	10~20	17.21±0.99 b	67.57±3.03 b	2.67±0.10 b	1.27±0.08 b
	20~30	27.72±1.00 a	48.29±2.51 a	2.08±0.11 b	1.19±0.12 b
幼龄林 SY	0~10	16.55±0.29 a	77.71±1.17 b	2.25±0.07 b	0.85±0.16 b
	10~20	22.37±0.44 a	56.71±0.89 c	2.08±0.03 c	1.39±0.15 b
	20~30	25.04±0.32 a	44.86±1.41 b	1.70±0.10 c	1.27±0.10 b

2.5 不同龄级马尾松林土壤抗蚀性的主成分分析

如表 5 所示,选取有机质含量、抗蚀指数、团聚

体破坏率、团聚状况、团聚度、分散率、分散系数、湿筛平均重量直径、湿筛平均几何直径、体积质量、干

筛团聚体含量、水稳性团聚体含量、毛管持水量 13 个指标,分别对 0~10,10~20,20~30 cm 土层土壤抗蚀性进行主成分分析,结果表明,3 个土层中均有 2 个主成分,且其累积贡献率均为 100.000%,说明用各土层中的 2 个主成分来评价土壤抗蚀性能的可靠性强。

由表 5 可以看出,在 0~10,10~20,20~30 cm 土层,第 1 主成分(Y_1)的贡献率均明显高于第 2 主成分(Y_2)。在 0~10 cm 土层, Y_1 、 Y_2 的贡献率分别为 83.903%,16.097%,对 Y_1 贡献率影响最大的抗蚀指标为毛管持水量,其次为团聚度、水稳性团聚体含量、团聚状况、湿筛平均重量直径、有机质含量和抗蚀指数。在 10~20 cm 土层, Y_1 、 Y_2 的贡献率分别为 70.911%,29.089%,对 Y_1 贡献率影响最大的抗蚀指标为湿筛平均重量直径,其次为团聚度、抗蚀指数、水稳性团聚体含量、有机质含量和团聚状况。

在 20~30 cm 土层中, Y_1 、 Y_2 的贡献率分别为 87.686%,12.314%,对 Y_1 贡献率影响最大的抗蚀指标为湿筛平均重量直径,其次为水稳性团聚体含量、有机质含量、团聚状况、抗蚀指数、团聚度和体积质量。

以上对不同龄级马尾松林土壤抗蚀性主成分分析发现,在 0~10,10~20,20~30 cm 土层,贡献率高且共有的抗蚀指标为有机质、水稳性团聚体含量和抗蚀指数、团聚度、团聚状况、湿筛平均重量直径。表明在喀斯特地区,随着不同龄级马尾松林土壤有机质含量的增加,土壤团粒结构得到改善,水稳性团聚体含量和湿筛平均重量直径增大,土壤抵抗水侵蚀的能力增强。因此,有机质、水稳性团聚体含量和抗蚀指数、团聚度、团聚状况、湿筛平均重量直径可作为喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的抗蚀指标。

表 5 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性主成分分析中各主成分的载荷值及特征值

Table 5 Characteristics and load values of principal components in principal component analysis on soil anti-erodibility of *Pinus massoniana* forests at different ages in typical Karst area

抗蚀性指标 Corrosion resistance index	0~10 cm 土层 0—10 cm soil layer		10~20 cm 土层 10—20 cm soil layer		20~30 cm 土层 20—30 cm soil layer	
	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component
X_1	0.920	-0.393	0.870	0.493	0.999	0.034
X_2	0.874	0.487	0.988	0.151	0.986	0.165
X_3	-0.935	0.356	-0.994	0.105	-0.724	0.690
X_4	0.966	-0.259	0.863	0.506	0.997	0.076
X_5	0.993	-0.121	0.991	0.137	0.973	0.231
X_6	-0.934	0.357	-0.872	-0.490	-0.996	0.091
X_7	-0.883	0.470	-0.552	0.834	-0.867	-0.498
X_8	0.965	0.263	0.994	-0.112	1.000	0.023
X_9	0.758	0.652	0.665	0.747	0.854	-0.520
X_{10}	-0.895	-0.446	-0.256	0.967	0.950	-0.313
X_{11}	0.763	0.647	0.753	-0.658	0.772	0.636
X_{12}	0.989	-0.146	0.981	-0.192	0.999	-0.034
X_{13}	0.994	-0.111	0.825	-0.565	-0.997	0.078
特征值 Eigenvalue	10.907	2.093	9.218	3.782	11.399	1.601
贡献率/% Rate of contribution	83.903	16.097	70.911	29.089	87.686	12.314
累积贡献率/% Cumulative contribution rate	83.903	100.000	70.911	100.000	87.686	100.000

注: X_1 . 有机质含量; X_2 . 抗蚀指数; X_3 . 团聚体破坏率; X_4 . 团聚状况; X_5 . 团聚度; X_6 . 分散率; X_7 . 分散系数; X_8 . 湿筛平均重量直径; X_9 . 湿筛几何平均直径; X_{10} . 体积质量; X_{11} . 干筛团聚体含量; X_{12} . 水稳性团聚体含量; X_{13} . 毛管持水量。下表同。

Note: X_1 . Organic matter content; X_2 . Anti-erodibility index; X_3 . Percentage of aggregate destruction; X_4 . Aggregation condition; X_5 . Degree of aggregation; X_6 . Dispersity; X_7 . Dispersion coefficient; X_8 . Wet sieve average weight diameter; X_9 . Geometric mean diameter of wet sieve; X_{10} . Volume mass; X_{11} . Aggregate content of dry sieve; X_{12} . Water stable aggregate content; X_{13} . Capillary water holding capacity. The same below.

通过对表 5 中 0~10,10~20,20~30 cm 土层 13 个抗蚀指标的主成分载荷值进行分析,计算得出

每个抗蚀指标的得分系数,结果见表 6。同时对各抗蚀指标主成分的载荷值进行标准化处理,并按照表 7 中回归方程分别计算 0~10,10~20,20~30 cm 土层 Y_1 、 Y_2 的得分 $F_1 \sim F_6$ 。

表 6 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性的主成分得分系数

Table 6 Principal component score coefficients of soil erodibility under <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas						
抗蚀性指标 Corrosion resistance index	0~10 cm 土层 0—10 cm soil layer		10~20 cm 土层 10—20 cm soil layer		20~30 cm 土层 20—30 cm soil layer	
	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	第 1 主成分(Y_1) First principal component	第 2 主成分(Y_2) Second principal component
X_1	0.279	-0.272	0.287	0.254	0.296	0.027
X_2	0.265	0.337	0.325	0.078	0.292	0.130
X_3	-0.283	0.246	-0.327	0.054	-0.214	0.545
X_4	0.292	-0.179	0.284	0.260	0.295	0.060
X_5	0.301	-0.084	0.326	0.070	0.288	0.183
X_6	-0.283	0.247	-0.287	-0.252	-0.295	0.072
X_7	-0.267	0.325	-0.182	0.429	-0.257	-0.394
X_8	0.292	0.182	0.327	-0.058	0.296	0.018
X_9	0.230	0.451	0.219	0.384	0.253	-0.411
X_{10}	-0.271	-0.308	-0.084	0.497	0.281	-0.247
X_{11}	0.231	0.447	0.248	-0.338	0.229	0.503
X_{12}	0.299	-0.101	0.323	-0.099	0.296	-0.027
X_{13}	0.301	-0.077	0.272	-0.291	-0.295	0.062

表 7 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性的回归方程

Table 7 Regression equation of soil erosion resistance of <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas		
土层/cm Soil layer	主成分指标 Principal component index	主成分回归方程 Principal component regression equation
0~10	第 1 主成分(Y_1) First principal component	$F_1=0.279X_1+0.265X_2-0.283X_3+0.292X_4+0.301X_5-0.283X_6-0.267X_7+0.292X_8+0.230X_9-0.271X_{10}+231X_{11}+0.299X_{12}+0.301X_{13}$
	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	$F_2=-0.272X_1+0.337X_2+0.246X_3-0.179X_4-0.084X_5+0.247X_6+0.325X_7+0.182X_8+0.451X_9-0.308X_{10}+0.447X_{11}-0.101X_{12}-0.077X_{13}$
10~20	第 1 主成分(Y_1) First principal component	$F_3=0.287X_1+0.325X_2-0.327X_3+0.284X_4+0.326X_5-0.287X_6-0.182X_7+0.327X_8+0.219X_9-0.084X_{10}+0.248X_{11}+0.323X_{12}+0.272X_{13}$
	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	$F_4=0.254X_1+0.078X_2+0.054X_3+0.260X_4+0.070X_5-0.252X_6+0.429X_7-0.058X_8+0.384X_9+0.497X_{10}-0.338X_{11}-0.099X_{12}-0.291X_{13}$
20~30	第 1 主成分(Y_1) First principal component	$F_5=0.296X_1+0.292X_2-0.214X_3+0.295X_4+0.288X_5-0.295X_6-0.257X_7+0.296X_8+0.253X_9+0.281X_{10}+0.229X_{11}+0.296X_{12}-0.295X_{13}$
	第 2 主成分(Y_2) Second principal component	$F_6=0.027X_1+0.130X_2+0.545X_3+0.060X_4+0.183X_5+0.072X_6-0.394X_7+0.018X_8-0.411X_9-0.247X_{10}+0.503X_{11}-0.027X_{12}+0.062X_{13}$

按式(1)~(4)计算 0~10,10~20,20~30 cm 土层土壤抗蚀性指数 $F_{0\sim 10\text{ cm}}$ 、 $F_{10\sim 20\text{ cm}}$ 、 $F_{20\sim 30\text{ cm}}$ 以及马尾松林土壤的综合抗蚀指数($F_{\text{综}}$)。

$$F_{0\sim 10\text{ cm}}=0.839\ 03F_1+0.160\ 97F_2,\tag{1}$$

$$F_{10\sim 20\text{ cm}}=0.709\ 11F_3+0.290\ 89F_4,\tag{2}$$

$$F_{20\sim 30\text{ cm}}=0.876\ 86F_5+0.123\ 14F_6,\tag{3}$$

$$F_{\text{综}}=F_{0\sim 10\text{ cm}}+F_{10\sim 20\text{ cm}}+F_{20\sim 30\text{ cm}}.\tag{4}$$

由表 8 可知,土壤综合抗蚀指数从大到小表现为成熟林(8.04)>中龄林(-0.29)>幼龄林(-7.75)。结果表明在喀斯特区域,随着马尾松林龄的增加,土壤综合抗蚀指数增大,土壤的抗蚀性增强。

表 8 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤的综合抗蚀指数

Table 8 Comprehensive erodibility index of soils under <i>Pinus massoniana</i> forests at different ages in typical Karst areas			
土层/cm Soil layer	成熟林 SC	中龄林 SZ	幼龄林 SY
0~10	2.52	0.46	-2.98
10~20	2.37	-0.33	-2.04
20~30	3.15	-0.42	-2.73
综合抗蚀指数 Composite corrosion resistance index	8.04	-0.29	-7.75

3 讨 论

3.1 不同龄级马尾松林土壤理化性质的影响因素及特征

土壤抗蚀性与土壤有机碳含量和植物林龄、根系密切相关^[29],这些因素会影响土壤的理化性质,进而影响土壤的抗蚀性。研究表明,枯落物的降解不仅降低了马尾松林表层土壤的 pH 值^[30],同时也为土壤输入养分和有机碳,改变了土壤的理化性质^[31]。土壤有机碳与团聚体之间存在相互影响,首先是团聚体作为土壤结构的基本单元,对有机碳的储存具有重要作用^[32];其次是土壤有机碳有助于水稳性团聚体胶结,改善土壤通透性和土壤结构,增加土壤团聚体含量,从而提高土壤的抗蚀性^[33-34]。此外,植物根系和林龄会对马尾松林土壤的理化性质产生影响。研究表明,马尾松的根系有利于土壤的团聚,使土壤体积质量下降,持水能力增强^[35],从而增大了土壤的抗蚀性。李玉凤等^[36]研究指出,随着马尾松林林龄增加,土层中有机碳含量增加,导致土壤体积质量下降,土壤的抗蚀性增加。以上研究表明,土壤有机碳含量和植物林龄、根系等的差异会影响土壤的理化性质,随着马尾松龄级的增加,土层中有机碳含量增多,体积质量下降,土壤团聚体的含量增大,土壤的抗蚀性增加。

研究表明,土壤团聚体含量及机械组成与土壤抗蚀性显著相关^[37]。在本研究中,除幼龄马尾松林外,其他 2 种马尾松林土壤干筛团聚体含量都随着土层深度的增加而增多,且 3 种林下土壤的黏粒($<0.001\text{ mm}$)都随着土层深度的增加而增大。这是由于黏粒($<0.001\text{ mm}$)含量越高,土壤通常容易板结^[38]。水稳性团聚体含量可以表征土壤抗蚀性的好坏,其含量越高,土壤结构抗蚀性越好^[39-40]。虽然在 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层以下粒径 $>0.25\text{ mm}$ 干筛团聚体含量高,但土壤团粒经过湿筛后容易崩塌,从而导致水稳性团聚体含量自地表向下减少。在马尾松幼龄林区域, $20\sim 30\text{ cm}$ 土层黏粒含量最大,但干筛团聚体含量低于表层($0\sim 10\text{ cm}$),这是由于表层根系发达,将土壤团聚体联结起来所致。当前大部分研究认为,粒径 $>0.25\text{ mm}$ 土壤颗粒含量越高,土壤的结构性越稳定^[41]。吕刚等^[42]研究指出,当粒径 $<0.25\text{ mm}$ 土壤颗粒含量较高时容易造成土壤缝隙堵塞,导致土壤水分难以下渗,从而增加了土壤的抗蚀性。而王春晓等^[43]在重庆岩溶山区的研究中指出,土壤体积质量越大,粒径 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团

聚体含量越低,土壤缝隙越小,对抗雨水冲刷能力越弱,土壤抗蚀性也越差。以上研究进一步说明,土壤抗蚀性不是单因素导致的,除了考虑土壤有机碳含量和植物林龄、根系外,还需要考虑土壤团聚体含量以及机械组成的影响。

3.2 不同龄级马尾松林土壤抗蚀性的差异

土壤抗蚀指数是评价土壤抵抗水侵蚀的重要指标,抗蚀指数越大土壤抗蚀能力越强^[44]。研究表明,土壤水稳性团聚体、平均重量直径和有机质对土壤抗蚀性有重要影响^[45-46]。其中水稳性团聚体含量越高,土壤结构的稳定性越好^[47],土壤抗蚀性也越强。闫思宇等^[48]对土壤各抗蚀性指标的主成分分析得出,水稳性团聚体是影响土壤抗蚀性的主要因素,且土壤有机质含量越高,水稳性团聚体、湿筛平均重量直径、孔隙度和团聚度越大,而分散率和体积质量越小。王燕等^[49]对川南不同林龄马尾松人工林的研究指出,从马尾松幼龄林到成熟林,土壤抗蚀性能整体上升,这是因为成熟林阶段土壤团粒结构和通透性得到改善。在本研究中,随着马尾松林龄的增加,土壤有机质、抗蚀指数、团聚度、团聚状况、水稳性团聚体含量和湿筛平均重量直径都增大,而土壤的分散率和体积质量减小,土壤抗蚀性能增强,这与前人的研究结果一致。

综上所述,马尾松林土壤受到植物林龄、根系和土壤有机质、团聚状况和机械组成等因素的影响,表现出不同的抗蚀性特征。土壤有机质的增加有利于水稳性团聚体的胶结,同时改善了土壤的团聚度和团聚状况。土壤机械组成影响土壤结构的稳定性,其中土壤的有机质、抗蚀指数、团聚度、团聚状况、湿筛平均重量直径和水稳性团聚体含量可以很好地反映土壤抗蚀性。为了揭示喀斯特地区马尾松林土壤的抗蚀性,需要将植物林龄、根系和土壤有机质、机械组成等因素结合起来,进一步对土壤抗蚀性开展综合性研究。

4 结 论

本试验对喀斯特地区不同龄级马尾松林 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层土壤的抗蚀性进行了研究,发现马尾松林土壤的理化性质存在差异,其中随着马尾松林龄的增加,土壤 pH 值下降,有机质含量表现为成熟林(94.49 g/kg) $>$ 中龄林(63.78 g/kg) $>$ 幼龄林(55.29 g/kg)。湿筛平均重量直径、团聚状况和水稳性团聚体含量均随着土层深度的增加而下降,表现为成熟林 $>$ 中龄林 $>$ 幼龄林。通过

对马尾松林土壤各抗蚀指标的主成分分析发现,有机质、抗蚀指数、团聚度、团聚状况、湿筛平均重量直径和水稳性团聚体含量为最适抗蚀指标。不同龄级马尾松林土壤的综合抗蚀指数表现为成熟林(8.04)>中龄林(-0.29)>幼龄林(-7.75)。

[参考文献]

- [1] 梁晓珍,符素华,丁琳.地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):21-26.
Liang X Z, Fu S H, Ding L. The influence of terrain factors' calculation methods on soil erosion evaluation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 21-26.
- [2] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35,81.
Xiao S Y, Shu Y G, Chen M J. Soil anti-erodibility under different vegetation types in Karst plateau gorge region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 30-35, 81.
- [3] Zhao L, Hou R. Human causes of soil loss in rural Karst environments: a case study of Guizhou, China [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-11.
- [4] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in Southwest China Karst area [J]. Carso-logica Sinica, 2010, 29(3): 274-279.
- [5] 邱陆畅.浙江省瓯江流域源头区林地土壤抗蚀特性及影响因素研究[D].杭州:浙江大学,2016.
Qiu L Y. Study on characteristics and influencing factors of forest soil anti-erodibility in headstream area of Oujiang Watershed in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [6] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.
He S Q, Gong Y B, Zheng Z C, et al. Changes and influences of soil anti-erodibility under different vegetation types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 17-22.
- [7] Egli M, Merkli C, Sartori G, et al. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence developed on carbonate-rich materials [J]. Geomorphology, 2008, 97(3/4): 675-696.
- [8] Cotler H, Ortega-Larrocea M P. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico [J]. Catena, 2006, 65(2): 107-117.
- [9] 李会,周运超,刘娟,等.喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应[J].中国水土保持科学,2015,13(5):16-23.
Li H, Zhou Y C, Liu J, et al. Responses of Karst soil anti-erodibility to different land use types [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 16-23.
- [10] 徐燕,龙健.贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):157-159,175.
Xu Y, Long J. Effect of soil physical properties on soil erosion in Guizhou Karst mountainous region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 157-159, 175.
- [11] 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[J].生态学报,2013,33(19):6303-6313.
Sheng M Y, Liu Y, Xiong K N. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6303-6313.
- [12] Wang Z H, Chiarucci A, Fang H, et al. An interspecific variation in rhizosphere effects on soil anti-erodibility [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 2411.
- [13] 孙永丽,梅再美.贵阳市白云岩地区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2006,24(2):27-31.
Sun Y L, Mei Z M. Effects of land use on soil physical properties in dolomite area of Guiyang [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2006, 24(2): 27-31.
- [14] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, land use, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [15] Jun Y L, Xiao L Y, Le G, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 304: 1-8.
- [16] 张晓,吴梦婉,SeMyung Kwon,等.不同林龄樟子松人工林径向生长对气候及地下水位变化的响应[J].生态学报,2022,42(16):1-11.
Zhang X, Wu M W, SeMyung Kwon, et al. Radial growth responses of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantations at different ages to climate and groundwater level changes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 1-11.
- [17] 王向栋,戴全厚,李翠莲,等.草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化[J].水土保持研究,2017,24(3):13-18,23.
Wang X D, Dai Q H, Li C L, et al. Variation of soil anti-erodibility during rocky desertification in upper reaches of Caohai [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 13-18, 23.
- [18] 王清,喻理飞,朱金兆,等.黔中白云岩地区植被恢复困难地土壤的抗蚀性[J].湖北农业科学,2012,51(8):1560-1565.
Wang Q, Yu L F, Zhu J Z, et al. Anti-erodibility of soil with different vegetation restoration difficulty grades in Dolostone Area of Guizhou [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(8): 1560-1565.
- [19] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J]. Catena, 2017, 153: 61-65.
- [20] 周政贤.中国马尾松[M].北京:中国林业出版社,2001.

Zhou Z X. Masson pine in China [M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2001.

[21] 孟祥江,何邦亮,马正锐,等. 我国马尾松林经营现状及近自然育林探索 [J]. 世界林业研究,2018,31(3):63-67.

Meng X J,He B L,Ma Z R,et al. Current situation of Masson pine forest management and its practice of close-to-nature silviculture in China [J]. World Forestry Research, 2018, 31 (3):63-67.

[22] 莫江明,彭少麟,Brown S,等. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应 [J]. 生态学报,2004,24(2):193-200.

Mo J M,Peng S L,Brown S,et al. Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(2):193-200.

[23] 姚天香. 推动贵州林下经济全产业链融合发展 [J]. 当代贵州,2021(51):62.

Yao T X. Promoting the integrated development of the whole industrial chain of the under-forest conomy in Guizhou [J]. Guizhou Today,2021(51):62.

[24] 潘玉道,潘 涛,韦龙晚,等. 三都县林下经济模式初探 [J]. 陕西林业科技,2021,49(5):98-102.

Pan Y D,Pan T,Wei L W,et al. The model of non-timber based forest economy in Sandu County [J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2021,49(5):98-102.

[25] 徐树建,任丽英,董玉良,等. 土壤地理学实验实习教程 [M]. 济南:山东人民出版社,2015.

Xu S J,Ren L Y,Dong Y L,et al. Experiment and practice in soil geography [M]. Jinan:Shandong People's Publishing House,2015.

[26] 刘宽梅,周秋文. 典型喀斯特森林土壤的抗蚀性 [J]. 生态学报,2020,40(2):568-577.

Liu K M,Zhou Q W. Study on soil anti-erodibility of typical Karst forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (2): 568-577.

[27] 庄 正,张 芸,张 颖,等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究 [J]. 水土保持学报,2017,31(6):183-188.

Zhuang Z,Zhang Y,Zhang Y,et al. Study on distribution characteristics and stability of soil aggregate in Chinese fir plantation at different developmental stages [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(6):183-188.

[28] 王亚萍,费学谦,姚小华,等. 不同产地油茶籽脂肪酸及甘油三酯的主成分分析和聚类分析 [J]. 中国油脂,2021,46(9):1-13.

Wang Y P,Fei X Q,Yao X H,et al. Principal component analysis and cluster analysis of fatty acids and triglycerides in oil-tea camellia seeds from different origins [J]. China Oils and Fats,2021,46(9):1-13.

[29] 王忠林,李会科,贺秀贤. 渭北旱塬花椒地埂林土壤抗蚀抗冲性研究 [J]. 水土保持研究,2000,7(1):33-37.

Wang Z L,Li H K,He X X. Study on soil anti-erosion and anti scour of prickly ash at edges of terraces in drought upland of Weibei [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000,7(1):33-37.

[30] 李 鹏,陈 璇,杨章旗,等. 不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报,2022,36(2):368-377.

Li P,Chen X,Yang Z Q,et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):368-377.

[31] 李学斌,陈 林,樊瑞霞,等. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2015,41(1):101-110.

Li X B,Chen L,Fan R X,et al. Effects of four typical plant community litter input on soil physical and chemical properties under the fenced condition in desert steppe [J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2015,41 (1):101-110.

[32] 季 波,时 龙,徐金鹏,等. 宁夏典型天然草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征 [J]. 生态学报,2021,41(19):7669-7678.

Ji B,Shi L,Xu J P,et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in typical natural grassland of Ningxia [J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(19):7669-7678.

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

Shen H,Jiang F Q,Du X J,et al. Evaluation on soil anti-erodibility of soil and water conservation forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(3):345-348.

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

Liu D D,Zhang P H,Wang J,et al. Current situation of Masson pine forest management an its practice of close-to-nature silviculture in China [J]. Scientia Silvae Sinicae,2013,49(9):102-106.

[35] 杨志训,秦连岗. 不同林龄马尾松人工林表层土壤养分特征分析 [J]. 林业资源管理,2014(3):101-104,121.

Yang Z X,Qin L G. Soil nutrient characteristics in different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. Forest Resources Management,2014(3):101-104,121.

[36] 李玉凤,马姜明,何静桦,等. 广西不同林龄马尾松人工林土壤碳储量动态变化 [J]. 广西科学,2020,27(6):638-645.

Li Y F,Ma J M,He J H,et al. Dynamic changes of soil carbon storage of *Pinus massoniana* plantations at different stand ages in Guangxi [J]. Guangxi Sciences,2020,27(6):638-645.

[37] 陈 涛,周利军,齐 实,等. 华莹市山区典型林分土壤团聚体稳定性及抗蚀能力 [J]. 浙江农林大学学报,2021,38(6):1161-1169.

Chen T,Zhou L J,Qi S,et al. Soil aggregate stability and anti-erodibility of typical forest stands in Huaying mountain area [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021,38(6):1161-1169.

[38] 史东梅,吕 刚,蒋光毅,等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究 [J]. 水土保持学报,2005,19(6):35-39.

- Shi D M, Lü G, Jiang G Y, et al. Study on anti-erodibility and change of soil physical property in *Pinus massoniana* woodland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 35-39.
- [39] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to run off and erosion; validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47(2): 133-149.
- [40] 王 冰, 周 扬, 张秋良. 兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1618-1628.
- Wang B, Zhou Y, Zhang Q L. Effects of *Larix gmelinii* stand age on composition and organic carbon content of soil aggregates [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1618-1628.
- [41] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695-4704.
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4695-4704.
- [42] 吕 刚, 吕向楠, 王 磊, 等. 辽西低山丘陵区不同密度荆条下表层土壤抗蚀性特征 [J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(4): 487-493.
- Lü G, Lü X N, Wang L, et al. Soil anti-erosion characteristics of surface soil under *Vitex negundo* L. with different densities in low mountainous upland region of western Liaoning Province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(4): 487-493.
- [43] 王春晓, 谢世友, 王 灿. 重庆南川岩溶山区土壤抗蚀性变化及预测模型研究 [J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 756-760.
- Wang C X, Xie S Y, Wang C. Research on changes of soil anti-erodibility and prediction model in Karst mountain areas in Chongqing Nanchuan [J]. Research of Agricultural Modernization, 2009, 30(6): 756-760.
- [44] 霍小鹏, 李贤伟, 张 健, 等. 川西亚高山暗针叶林土壤渗透性能研究 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 192-195.
- Huo X P, Li X W, Zhang J, et al. Soil permeability capability of subalpine coniferous forests in western Sichuan, China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(3): 192-195.
- [45] 赵锦梅, 徐长林, 马 瑞, 等. 东祁连山不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性研究 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 119-123.
- Zhao J M, Xu C L, Ma R, et al. Study on soil anti-erodibility of different alpine shrub grassland in Eastern Qilian Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 119-123.
- [46] 姜兴雪, 查瑞波, 毛兰花, 等. 花岗岩红壤侵蚀退化地不同治理模式土壤抗蚀性评价 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 31-37.
- Jiang X X, Zha R B, Mao L H, et al. Evaluation of soil erosion resistance under different treatment modes in erosion degraded land of granite red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 31-37.
- [47] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils [J]. Geoderma, 2015, 243: 205-213.
- [48] 闫思宇, 王景燕, 龚 伟, 等. 川南山地林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1112-1120.
- Yan S Y, Wang J Y, Gong W, et al. Effects of forest change on soil physical properties and anti-erodibility in southern Sichuan mountains [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(7): 1112-1120.
- [49] 王 燕, 宫渊波, 尹艳杰, 等. 不同林龄马尾松人工林水土保持功能 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 23-27, 31.
- Wang Y, Gong Y B, Yin Y J, et al. Soil and water conservation functions of *Pinus massoniana* plantation at different forest ages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 23-27, 31.

(上接第 50 页)

- [61] Yang S T, Liu X J, Qiao S, et al. Starch content differences between two sweet potato accessions are associated with specific changes in gene expression [J]. Functional & Integrative Genomics, 2018, 18(6): 613-625.
- [62] 张 毅, 吴万亿, 刘霞宇, 等. 利用 WGCNA 鉴定甘薯耐盐相关共表达网络及核心基因 [J]. 河南农业科学, 2021, 50(6): 16-27.
- Zhang Y, Wu W Y, Liu X Y, et al. Identification of salt tolerance co-expression modules and hub genes in *Ipomoea batatas* by WGCNA [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(6): 16-27.
- [63] Cao Q H, Li A, Chen J Y, et al. Transcriptome sequencing of the sweet potato progenitor (*Ipomoea trifida* (H. B. K.) G. Don.) and discovery of drought tolerance genes [J]. Tropical Plant Biology, 2016, 9(2): 63-72.
- [64] Liao J, Lu X Y, Shao X, et al. Uncovering an organ's molecular architecture at single-cell resolution by spatially resolved transcriptomics [J]. Trends in Biotechnology, 2021, 39(1): 43-58.
- [65] Buenrostro J D, Giresi P G, Zaba L C, et al. Transposition of native chromatin for fast and sensitive epigenomic profiling of open chromatin, DNA-binding proteins and nucleosome position [J]. Nat Methods, 2013, 10(12): 1213-1218.
- [66] Dong Q L, Li N, Li X C, et al. Genome-wide Hi-C analysis reveals extensive hierarchical chromatin interactions in rice [J]. Plant J, 2018, 94(6): 1141-1156.
- [67] Rhee S Y, Birnbaum K D, Ehrhardt D W. Towards building a plant cell atlas [J]. Trends Plant Sci, 2019, 24(4): 303-310.