成土母质和土地利用方式对典型红壤抗蚀性的影响

施 招[1], 刘 婷[1], 饶 宸[1], 张文钊[2,4],
刘 锋[3,4], 侯海军[2,4], 陈生勇[5], 何 静[5]

(1.中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南 长沙 410600;
2.中国科学院 亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站, 湖南 长沙 410125; 3.中国科学院 亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站, 湖南 长沙 410125; 4.中国科学院 亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125; 5.湖南省常德市桃源县水利局, 湖南 常德 415000)

摘 要: [目的] 探究成土母质和土地利用方式对典型红壤抗蚀性的影响,为红壤区水土流失防治和红壤资源合理开发利用提供重要基础数据和参考依据。[方法] 以湖南省沩水流域的典型红壤为研究对象,选取了第四纪红黏土、砂岩、板页岩和花岗岩风化物等 4 种典型成土母质发育的旱地、稻田、园地和林地共 16 个类型组合的红壤,研究了不同成土母质和土地利用方式下的红壤抗蚀性差异特征。[结果] ①土地利用方式显著($p<0.05$)影响红壤抗蚀性,稻田、园地和林地土壤的抗蚀性和水稳性指数均显著($p<0.05$)高于旱地。②不同成土母质发育的红壤抗蚀性无显著($p>0.05$)差异,且其与土地利用方式的交互作用对抗蚀性的影响不明显。③土地利用方式显著($p<0.05$)改变了>0.25 mm 水稳性团聚体($WSA_{0.25}$)和有机质含量,林地土壤 $WSA_{0.25}$ 含量显著($p<0.05$)高于旱地,稻田土壤有机质含量显著($p<0.05$)高于旱地、园地和林地。④成土母质对 $WSA_{0.25}$ 含量的影响不显著($p>0.05$),但显著($p<0.05$)改变了红壤有机质和黏粒含量,花岗岩风化物发育的红壤有机质和黏粒含量均显著($p<0.05$)低于其他成土母质发育的红壤。⑤相关性分析显示红壤抗蚀性和水稳性指数均与 $WSA_{0.25}$ 和有机质含量呈显著($p<0.05$)正相关关系,而与黏粒含量无显著($p>0.05$)相关性。[结论] 土地利用方式和成土母质可通过改变 $WSA_{0.25}$ 和有机质含量影响红壤抗蚀性能,但土地利用方式对红壤抗蚀性的影响强于成土母质。在红壤水土流失防治过程中应以土地利用方式调整和布局优化为主,兼顾成土母质类型。

关键词: 红壤; 抗蚀性指数; 成土母质; 土地利用方式; 水稳性团聚体; 有机质

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)02-0081-10 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 施招, 刘婷, 饶宸, 等.成土母质和土地利用方式对典型红壤抗蚀性的影响[J].水土保持通报, 2025,45(2):81-90. Shi Zhao, Liu Ting, Rao Chen, et al. Effects of parent materials and land-use types on anti-erodibility of typical red soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):81-90. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.010; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.010.

Effects of parent materials and land-use types on anti-erodibility of typical red soils

Shi Zhao[1], Liu Ting[1], Rao Chen[1], Zhang Wenzhao[2,4],
Liu Feng[3,4], Hou Haijun[2,4], Chen Shengyong[5], He Jing[5]

(1.*Changsha General Survey of Natural Resources Center*, *Changsha*, *Hunan* 410600, *China*;
2.*Taoyuan Agro-Ecology Research Station of Chinese Academy of Sciences*, *Institute of Subtropical Agriculture*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*; 3.*Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring*, *Institute of Subtropical Agriculture*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*; 4.*Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions*, *Institute of Subtropical Agriculture*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*; 5.*Water Conservancy Bureau of Taoyuan County*, *Changde*, *Hunan* 415000, *China*)

收稿日期: 2024-10-25 **修回日期:** 2025-01-04 **采用日期:** 2025-01-06
资助项目: 中国地质调查局项目"湘江下游自然资源综合调查"(DD20220874)
第一作者: 施招(1991—),男(汉族),湖南省常德市人,硕士,工程师,主要从事自然资源调查监测方面的研究。Email:shizhao1991@foxmail.com。
通信作者: 张文钊(1981—),男(汉族),河南省南阳市人,博士,副研究员,主要从事农田养分循环过程与生态调控方面的研究。Email:wzhzh@isa.ac.cn。

Abstract: [Objective] The effects of parent material and land use patterns on the erosion resistance of typical red soils were explored, in order to provide fundamental data and references for soil erosion control and rational utilization of red soil resources in red soil regions. [Methods] The typical red soil of the Weishui River basin in Hunan Province was taken as the research object. A total of 16 types of red soil-including dry land, paddy fields, gardens, and forests, which were derived from four typical soil parent materials (Quaternary red clay, sandstone, plate shale, and granite)-were selected to study the differences in the anti-erodibility of red soils with different parent materials and land-use types. [Results] ① Land-use types significantly ($p<0.05$) affected red soil anti-erodibility. The anti-erodibility and water stability indexes of paddy fields, gardens, and forests were significantly higher ($p<0.05$) than those of dry land. ② There was no significant ($p>0.05$) difference in the anti-erodibility of red soil derived from different parent materials, and the interaction between them and land-use type on anti-erodibility was not significant. ③ Land-use types significantly ($p<0.05$) changed the content of water-stable aggregate ($WSA_{0.25}$) and soil organic matter. The $WSA_{0.25}$ of forests was significantly ($p<0.05$) higher than that of dry land, and the content of the soil's organic matter in paddy soil was significantly ($p<0.05$) higher than that of dry land, gardens, and forests. ④ The effect of soil-forming parent materials on $WSA_{0.25}$ was not significant ($p>0.05$), but they significantly ($p<0.05$) changed the content of organic matter and clay in red soil, which were significantly ($p<0.05$) lower in soil derived from granite than that derived from the other three parent materials. ⑤ Correlation analysis showed that the anti-erodibility and water-stable indexes were significantly ($p<0.05$) correlated with $WSA_{0.25}$ and the soil's organic matter. [Conclusion] Both land-use types and parent materials can affect the anti-erodibility of red soil by changing $WSA_{0.25}$ and the soil's organic matter, but the impact of land-use type on anti-erodibility is significantly stronger than that of the parent material. Hence, the prevention and control of soil and water loss in red soil should be based on the optimization of the adjustment and layout of land-use types, taking soil parent materials into account.

Keywords: red soil; anti-erodibility index; parent materials; land-use type; water-stable aggregate; organic matter

中国南方红壤区总面积约 2.20×10^6 km^2，占全国土地总面积的 22.7%，是中国最重要的热带亚热带土壤资源[1]。红壤区地形多以起伏较大的丘陵为主，成土母质和土地利用方式多样，降雨集中且强度大，强降雨多发，加之不合理的土地开发和利用，区域水土流失现象严重[2]，是仅次于黄土高原的第二大土壤侵蚀退化区[3]，严重阻碍了当地自然资源和社会经济的可持续发展。因此，开展红壤区土壤侵蚀研究对于红壤资源的合理开发利用与高效管理具有重要意义。

土壤抗蚀性是指土壤抵抗外营力对其分散和破坏的能力，是评估土壤抵抗侵蚀能力的重要参数之一[4]。土壤抗蚀性的强弱与土壤本身的理化特性密切相关[5-7]。土壤结构、质地、有机质含量和胶体性质等均是影响土壤抗蚀能力的重要因素[8-9]。通过多元回归分析，J.Mallick 等[6]对影响土壤抗蚀性的关键因子进行了研究，发现质地和有机质含量可共同解释土壤抗蚀性 78%的变异性。这些土壤理化特性在很大程度上又受内在因素—成土母质的影响。成土母质除了造成土壤颜色差异外，还会引起土壤质地、结构等理化特性的差异，进而影响土壤抗蚀能力[10-12]。由石灰岩、玄武岩风化物发育的土壤水稳性团聚体含量较高，其土壤抗蚀性相对较强，而由花岗岩、红砂岩等母质发育的红壤由于水稳性团聚体含量较低，其土壤抗蚀性相对较弱[12]。此外，土壤抗蚀性的强弱还受土地利用方式等外部因素的影响[11,13]。不同的土地利用方式会导致土壤质地和有机质含量等土壤性质产生差异，因而其土壤抗蚀能力也会不同。N. Özdemir[11]经研究发现，与草地相比，旱地因频繁翻耕破坏了土壤结构，致使团聚体稳定性下降，从而削弱其抵抗侵蚀作用的能力。张华渝等[13]对滇中尖山河流域不同土地利用类型的侵蚀特性进行了评价，发现与裸地和坡耕地相比，园地和林地可显著提升土壤有机碳和>0.25 mm 的水稳性团聚体($WSA_{0.25}$)含量，进而提高了土壤抗蚀性。显然，成土母质和利用方式均可通过改变土壤理化性状影响土壤抵抗侵蚀能力。

近些年来关于红壤抗蚀性的研究相对较多，但大多集中在同一母质背景下不同水土保持措施或不同植被恢复阶段的土壤抗蚀性研究[7,9,14]。由于红壤发育来源于不同成土母质，且红壤区土地利用方式多样化。因此，红壤抗蚀性可能受到成土母质和土地利用

方式的双重影响,而有关这方面的研究则较为缺乏。以往研究通过主成分分析、灰色关联度分析、熵权法和路径分析等方法选取多项指标对土壤抗蚀性进行评价,其中土壤抗蚀性指数和水稳性指数被视为评价土壤抗蚀性的重要指标[7-8,15]。为此,本文在湖南省沩水流域的典型红壤区选取了第四纪红黏土、砂岩、板页岩和花岗岩风化物等 4 种典型成土母质发育的旱地、稻田、园地和林地等 4 种主要土地利用方式,共 16 个类型组合的红壤,以土壤抗蚀性指数和水稳性指数为重要指标表征土壤抗蚀能力,研究成土母质和土地利用方式及二者交互作用对红壤抗蚀性的影响,以期为红壤资源生态高效利用和可持续性发展提供重要参考依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于湘江下游的沩水流域,地处湘东偏北的洞庭湖南缘地区,雪峰山余脉向东北滨湖平原过渡地带,地势上由西向东,按山、丘、岗、平等地貌类型逐渐降低,上游陡峻,下游平缓。沩水流域属亚热带大陆性季风气候,雨水充足,年均降水量为 1 358 mm,主要集中在 4—9 月,强降雨多发,易引发水土流失。据 2021 年长沙市水土保持公报数据显示,沩水流域内的宁乡市 2021 年水土流失面积达 265.2 km^2,其中水土流失强度中度以上达 17.09 km^2,是长沙市土壤侵蚀程度最高的地区之一。流域内土地利用方式多样,旱地、稻田、园地和林地交错分布。红壤的母质资源丰富,以第四纪红黏土、砂岩、板页岩和花岗岩风化物为主,属于典型的南方红壤丘陵区。

1.2　样品采集与处理

2023 年 5—9 月在沩水流域选取旱地、水田、园地和林地等 4 种主要土地利用方式,每种土地利用方式选取第四纪红黏土、砂岩、板页岩和花岗岩风化物等 4 种典型母质发育的红壤采集土壤样品(图 1)。林地均位于坡顶,为次生针阔混交林,成林时间均在 15 a 以上,植被覆盖度较好,受人类活动干扰少;园地和旱地均位于坡中,园地主要为树龄 5 a 以上的果树和油茶,旱地主要种植作物为红薯和当季蔬菜;水田均位于坡麓平坦区域,主要为双季稻。每种组合类型红壤均选取 4 个采集样点,共计 64 个土壤样品。每个样点按照五点法采集 0—20 cm 土层 3 kg 左右混合土样,装入硬质塑料盒中密封带回实验室,在实验室内沿土壤自然断裂面剥开,将原状土样剥成直径为 10 mm 左右的小土块,取出动植物残体及碎石等杂物后自然风干备用。

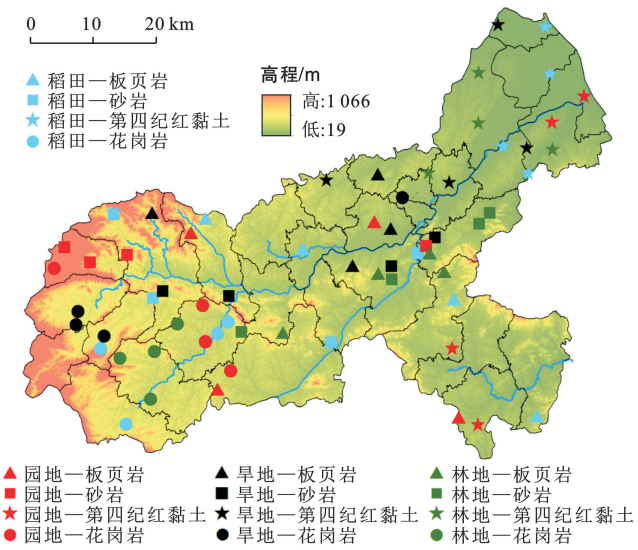


图 1　沩水流域地形及采样点分布区土地利用类型和土壤母质

Fig.1　Topography of Weishui River basin, land use types and soil parent materials in sampling point distribution areas

1.3　测试指标及方法

1.3.1　土壤抗蚀性测定　土壤抗蚀性指标包括抗蚀性指数和水稳性指数。土壤抗蚀性指数和水稳性指数的测定方法采用静水崩解法[14]。将所取原状土按自然结构掰成直径约 10 mm 土粒,自然风干后过 7 mm 土筛,挑选出直径为 7～10 mm 的土粒 50 颗,放置于 5 mm 孔径的不锈钢滤网上浸水并观测,以 1 min 为间隔,分别记录分散土粒的数量,连续观测 10 min,重复测试 3 次,最后取 3 次数据的平均值,用于计算土壤抗蚀性指数和水稳性指数。

1.3.2　土壤水稳性团聚体测定　采用湿筛法[16]测定土壤水稳性团聚体,具体方法如下:称取过 8 mm 筛风干土样 500 g,置于 2 mm 土筛上,迅速浸在室温下的去离子水中 10 min,然后人工上下振动 5 min,振动频率为 25 次/min,振幅为 4 cm,把留在筛上的团聚体用去离子水冲洗到不锈钢盆中,直至水流清亮;将通过 2 mm 筛子的团聚体和水通过 0.25 mm 筛,重复上述操作。将分离出来的各级团聚体转移至铝盒,在 40 ℃下烘干,称重,最终得到粗大团聚体(>2 mm)、细大团聚体(2～0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)3 个粒径的水稳定性团聚体。

1.3.3　土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定[17]　土壤粒级分布采用 H_2O_2-HCl-$(NaPO_3)_6$ 法[18]预处理后使用激光粒度仪(Mastersizer 2 000, England-Malvern,英国)测定样品各粒径的体积百分比含量,土壤颗粒粒径分级标准采用美国农业部制土壤颗粒分级标准(黏粒<0.002 mm,粉粒0.002～0.05 mm,砂粒 0.05～2 mm)。

1.4 数据分析

土壤抗蚀性指数的计算公式为[14]：

$$S=\frac{P_j}{A}\times 100\% \tag{1}$$

式中：S 为抗蚀性指数；P_j 为 10 min 内未分散的土粒数(粒)；A 为试验土粒总数(粒)。

土壤水稳性指数的计算公式为[14]：

$$K=\frac{\sum P_i K_i+P_j}{A} \tag{2}$$

式中：K 为水稳性指数；$i=1,2,3\cdots10$；P_i 为第 i 分钟分散的土粒数(粒)；K_i 为第 i 分钟校正系数，分别为 5%，15%，25%，35%，45%，55%，65%，75%，85%和 95%。

采用大于 0.25 mm 粒径的水稳性团聚体比例表征土壤团聚体的稳定性，其计算公式为[16]：

$$\mathrm{WSA}_{0.25}=\frac{M_{T>2}+M_{T>0.25}}{M_T}\times 100\% \tag{3}$$

式中：$\mathrm{WSA}_{0.25}$ 为>0.25 mm 的水稳性团聚体比例(%)；$M_{T>2}$ 为> 2 mm 的水稳性团聚体重量(g)；$M_{T>0.25}$ 为>0.25 mm 的水稳性团聚体重量(g)；M_T 为团聚体样品总重量(g)。

平均重量直径(MWD)可表征土壤团聚体稳定性，其计算公式为[16]：

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n} x_i w_i \tag{4}$$

式中：x_i 表示粒级团聚体的平均直径(mm)；w_i 表示粒级团聚体质量所占样品总重量的百分比(%)。

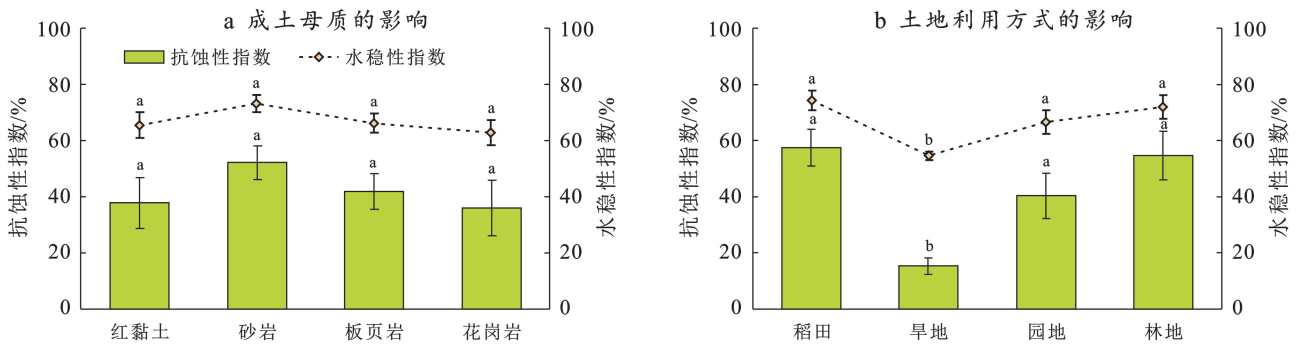
采用 Excel 2013 对所有测定结果整理汇总和初步计算，采用 Origin 2023b 进行作图，通过 SPSS Statistic 20 对数据进行方差分析和相关性分析，采用 Duncan 多重比较和字母标记法判断差异显著性和标注。

2 结果与分析

2.1 成土母质和土地利用方式对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响

2.1.1 成土母质对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响 由图 2a 可以看出，4 种成土母质发育的红壤抗蚀性指数整体偏低，均低于 60%，表明红壤抵抗水蚀能力相对较弱。其中，砂岩风化物发育的红壤抗蚀性指数最高，分别比第四纪红黏土、板页岩和花岗岩风化物发育的红壤高出 27.54%，19.76%和 31.14%，其次为板页岩风化物发育的红壤，花岗岩风化物发育的红壤抗蚀性指数最低，但不同成土母质发育的红壤抗蚀性指数差异不显著($p>0.05$)。

由图 2a 可知，4 种成土母质发育的红壤水稳性指数差异趋势与抗蚀性指数相似，表现为：砂岩>板页岩>第四纪红黏土>花岗岩，但不同成土母质间差异相对较小，均未达到 0.05 显著性水平，表明成土母质对红壤水稳性指数的影响相对较弱。



注：图中不同小写字母表示不同成土母质或土地利用方式红壤间的抗蚀性指数或水稳性指数差异显著($p<0.05$)。

图 2 成土母质(a)和土地利用方式(b)对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响

Fig.2 Effect of soil parent materials (a) and land use types (b) on anti-erodibility and water stability indexes of red soils

2.1.2 土地利用方式对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响 土地利用方式显著影响红壤抗蚀性指数(图 2b)。其中，稻田土壤抗蚀性指数最高，其平均值为 57.50%，显著($p<0.05$)高于旱地。其次为林地和园地，二者的抗蚀性指数也均显著($p<0.05$)高于旱地。稻田、林地和园地 3 种土地利用方式的土壤抗蚀性指数差异不显著($p>0.05$)。同样，土地利用方式也显著影响红壤水稳性指数。不同土地利用方式间土壤水稳性指数表现为：稻田>林地>园地>旱地，其中稻田、林地和园地土壤水稳性指数差异未达到 0.05 显著水平，但均显著($p<0.05$)高于旱地。

2.1.3 成土母质和土地利用方式的交互作用对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响 由表 1 可知，在不同土地利用方式下，成土母质对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响均不显著($p>0.05$)。但在 4 种土地利用方式下，4 种成土母质发育的红壤抗蚀性指数和

水稳性指数的大小趋势并不一致,如在稻田土壤中,4 种成土母质发育的红壤抗蚀性指数的大小依次为:第四纪红黏土>砂岩>花岗岩>板页岩,而在园地利用方式下则表现为:砂岩>板页岩>花岗岩>第四纪红黏土,表明成土母质对红壤抗蚀性有一定程度的影响。

与成土母质相比,土地利用方式则显著($p<0.05$)影响红壤抗蚀性指数和水稳性指数。如在第四纪红黏土发育的红壤中,稻田土壤的抗蚀性指数和水稳性指数均显著($p<0.05$)高于旱地和园地。同样在砂岩风化物发育的红壤中,稻田土壤的抗蚀性指数和水稳性指数均显著($p<0.05$)高于旱地。

双因素方差分析结果也表明利用方式显著($p<0.01$)影响红壤抗蚀性指数和水稳性指数,而成土母质及其与土地利用方式的交互作用对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响未达显著水平($p>0.05$)。这表明土地利用方式对红壤抗蚀性指数和水稳性指数的影响程度显著强于成土母质,成土母质与土地利用方式影响红壤抗侵蚀能力的交互作用不明显。

2.2　成土母质和土地利用方式对水稳性团聚体稳定性的影响

2.2.1　成土母质和土地利用方式对红壤 $WSA_{0.25}$ 的影响　4 种成土母质发育的红壤中 $WSA_{0.25}$ 含量高低依次表现为:第四纪红黏土>花岗岩>板页岩>砂岩,但差异不显著($p>0.05$)(图 3a)。4 种土地利用方式中 $WSA_{0.25}$ 含量高低依次表现为:林地>园地>水田>旱地,且林地土壤 $WSA_{0.25}$ 含量显著($p<0.05$)高于旱地(图 3a)。这表明土地利用方式显著($p<0.05$)影响红壤 $WSA_{0.25}$ 分布,而成土母质对其影响未达 0.05 显著水平。双因素方差分析结果也表明土地利用方式显著($p<0.05$)影响红壤 $WSA_{0.25}$ 含量,成土母质及其与土地利用方式的交互作用对 $WSA_{0.25}$ 含量的影响不显著($p>0.05$)(表 2)。

表 1　成土母质和土地利用方式对红壤抗蚀性指数和水稳性指数影响的双因素方差分析

Table 1　Two-way ANOVA of effects of soil parent materials and land use types on erosion resistance index and water stability index of red soil　%

土地利用方式	成土母质	抗蚀性指数	水稳性指数
稻田	第四纪红黏土	72.50 ± 12.67^{aA}	82.13 ± 7.65^{aA}
	砂 岩	60.00 ± 9.13^{aA}	77.31 ± 3.08^{aA}
	板页岩	41.25 ± 9.44^{aA}	62.56 ± 4.05^{aA}
	花岗岩	56.25 ± 19.51^{aA}	75.25 ± 9.01^{aA}
旱地	第四纪红黏土	10.00 ± 5.40^{aB}	49.88 ± 2.89^{bB}
	砂 岩	23.75 ± 5.54^{aB}	60.88 ± 2.94^{aB}
	板页岩	20.00 ± 5.77^{aA}	55.50 ± 2.82^{abA}
	花岗岩	7.50 ± 4.78^{aA}	52.19 ± 1.34^{bA}
园地	第四纪红黏土	20.00 ± 10.80^{aB}	52.19 ± 1.34^{aB}
	砂 岩	56.25 ± 12.14^{aA}	71.56 ± 7.56^{aAB}
	板页岩	51.25 ± 19.51^{aA}	73.19 ± 10.86^{aA}
	花岗岩	33.75 ± 19.08^{aA}	63.88 ± 9.54^{aA}
林地	第四纪红黏土	48.75 ± 22.58^{aAB}	71.88 ± 10.67^{aAB}
	砂 岩	68.75 ± 8.98^{aA}	82.94 ± 4.35^{aA}
	板页岩	55.00 ± 9.13^{aA}	73.38 ± 3.84^{aA}
	花岗岩	46.25 ± 26.88^{aA}	59.88 ± 11.09^{aA}
F 值	L	7.36^{**}	6.45^{**}
	M	1.04	1.64
	$L\times M$	0.65	1.07

注:①表中不同小写字母表示同一土地利用方式内数值差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一成土母质内数值差异显著($p<0.05$)。②L 为土地利用方式。③M 为成土母质;** 表示在 $p<0.01$ 水平影响显著。下同。

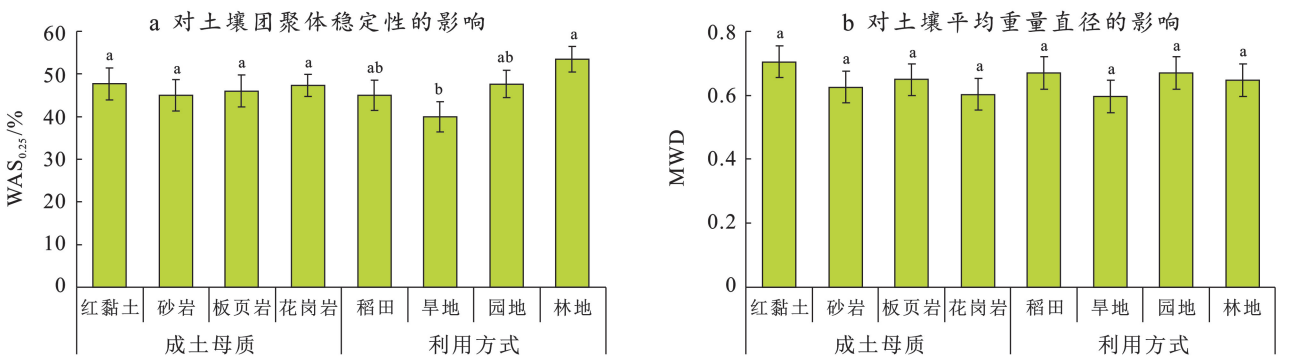


图 3　成土母质(a)和土地利用方式(b)对红壤>0.25 mm 水稳性团聚体($WAS_{0.25}$)含量和平均重量直径(MWD)的影响

Fig.3　Effect of soil parent materials (a) and land use types (b) on content of water-stable aggregates with diameter >0.25 mm ($WAS_{0.25}$) and mean weight diameter (MWD) of red soils

2.2.2　成土母质和土地利用方式交互作用对红壤水稳性团聚体 MWD 的影响　由图 3b 可知,成土母质和土地利用方式对红壤水稳性团聚体 MWD 的影响均未达到 0.05 显著水平。不同成土母质发育的红壤水稳性团聚体 MWD 高低依次为:第四纪红黏土>板页岩>砂岩>花岗岩。4 种土地利用方式下红壤水

稳性团聚体 MWD 依次表现为:稻田>园地>林地>旱地。由表 2 可以看出,成土母质显著($p<0.05$)影响林地土壤水稳性团聚体 MWD,第四纪红黏土发育的土壤水稳性团聚体 MWD 显著($p<0.05$)高于其他 3 种成土母质发育的土壤,但成土母质对其他 3 种土地利用方式下 MWD 影响不显著($p>0.05$)。土地利用方式显著($p<0.05$)影响第四纪红黏土发育的红壤 MWD 值,林地土壤 MWD 值显著($p<0.05$)高于旱地和园地,但土地利用方式对其他 3 种成土母质发育的红壤 MWD 值影响不显著($p>0.05$)。这表明成土母质和土地利用方式对红壤 MWD 值的影响存在一定的交互作用,但并不显著($p>0.05$)。

表 2 成土母质和土地利用方式对红壤 $WSA_{0.25}$,MWD,有机质和黏粒含量的影响

Table 2 Two-way ANOVA of effects of parent materials and land use types on $WSA_{0.25}$, MWD, soil organic matter and clay content of red soils

土地利用方式	成土母质	$WSA_{0.25}$/%	MWD/mm	有机质/(g·kg^{-1})	黏粒/%
稻田	第四纪红黏土	46.87 ± 6.42^{aAB}	0.70 ± 0.06^{aAB}	35.99 ± 1.82^{aA}	20.09 ± 1.91^{aA}
	砂 岩	40.36 ± 10.80^{aA}	0.67 ± 0.13^{aA}	29.91 ± 5.48^{aA}	21.71 ± 4.64^{aA}
	板页岩	38.80 ± 4.60^{aA}	0.62 ± 0.04^{aA}	28.92 ± 5.33^{aA}	20.30 ± 1.824^{aA}
	花岗岩	53.88 ± 4.77^{aA}	0.68 ± 0.12^{aA}	20.04 ± 7.16^{aA}	9.08 ± 2.24^{bA}
旱地	第四纪红黏土	42.37 ± 6.71^{aB}	0.63 ± 0.06^{aB}	13.10 ± 3.59^{abC}	19.86 ± 6.86^{aA}
	砂 岩	41.97 ± 7.24^{aB}	0.61 ± 0.06^{aA}	20.90 ± 2.51^{aA}	23.23 ± 6.26^{aA}
	板页岩	42.72 ± 10.64^{aA}	0.58 ± 0.10^{aA}	22.14 ± 2.47^{aA}	23.97 ± 4.15^{aA}
	花岗岩	32.68 ± 4.76^{aA}	0.56 ± 0.07^{aA}	10.82 ± 2.86^{bA}	13.73 ± 6.51^{aA}
园地	第四纪红黏土	37.11 ± 2.84^{aB}	0.59 ± 0.02^{aB}	16.68 ± 2.13^{aBC}	24.73 ± 8.35^{aA}
	砂 岩	48.01 ± 47.54^{aA}	0.62 ± 0.14^{aA}	20.66 ± 4.13^{aA}	17.24 ± 2.65^{aA}
	板页岩	54.03 ± 7.94^{aA}	$0.78\pm.012^{aA}$	22.84 ± 2.14^{aA}	23.07 ± 682^{aA}
	花岗岩	51.36 ± 4.95^{aA}	0.69 ± 0.08^{aA}	14.83 ± 3.66^{aA}	13.75 ± 3.25^{aA}
林 地	第四纪红黏土	64.33 ± 7.39^{aA}	0.89 ± 0.12^{aA}	25.04 ± 4.47^{aB}	36.09 ± 1.93^{aA}
	砂岩	49.56 ± 4.58^{aA}	0.60 ± 0.07^{bA}	27.07 ± 4.97^{aA}	25.29 ± 2.32^{bA}
	板页岩	48.31 ± 6.18^{aA}	0.62 ± 0.09^{bA}	19.40 ± 2.50^{aA}	25.61 ± 2.95^{bA}
	花岗岩	51.55 ± 3.39^{aA}	0.47 ± 0.01^{bA}	14.18 ± 3.75^{aA}	5.70 ± 2.31^{cA}
F 值	*L*	2.84^{*}	0.29	6.99^{**}	1.67
	M	0.14	0.69	4.86^{**}	3.35^{*}
	$L\times M$	1.30	1.43	0.97	1.28

注:$WSA_{0.25}$为>0.25 mm 的水稳性团聚体;MWD 为平均重量直径。

2.3 成土母质和土地利用方式土壤有机质含量的影响

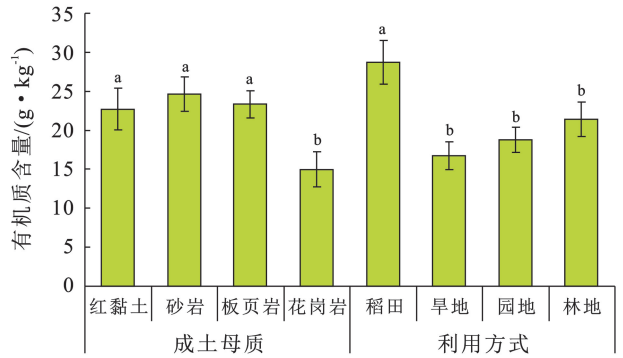
成土母质(M)和土地利用方式(L)均显著($p<0.05$)影响红壤有机质含量(图 4)。在 4 种成土母质发育的红壤中,砂岩风化物发育的红壤有机质含量最高,显著($p<0.05$)高于花岗岩风化物发育的红壤,但与其他 2 种成土母质发育的红壤差异不显著($p>0.05$)。第四纪红黏土和板页岩风化物发育的红壤有机质含量差异不显著($p>0.05$),但均显著($p<0.05$)高于花岗岩风化物发育的红壤。在 4 种土地利用方式中,稻田土壤有机质含量显著($p<0.05$)高于其他 3 种利用方式。旱地、园地和林地土壤有机质含量差异不显著($p>0.05$)(图 4)。

由表 2 可以看出,成土母质显著影响($p<0.05$)旱地土壤有机质含量,板页岩和砂岩风化物发育的旱地红壤有机质含量显著($p<0.05$)高于花岗岩风化物发育的红壤。成土母质对稻田、园地和林地土壤有机质含量影响均不显著($p>0.05$)。土地利用方式显著($p<0.05$)影响第四纪红黏土发育的红壤有机质含量,稻田土壤有机质含量显著($p<0.05$)高于旱地、园地和林地土壤,且林地土壤有机质含量显著($p<0.05$)高于旱地土壤。土地利用方式对砂岩、板页岩和花岗岩风化物发育的红壤有机质含量影响不显著($p>0.05$)。双因素方差分析结果表明,尽管成土母质和土地利用方式均显著($p<0.05$)影响红壤有机质含量,但二者的交互作用对红壤有机质含量的影响不显著($p>0.05$)。

2.4 成土母质和土地利用方式对土壤黏粒含量的影响

由图 5 可以看出,成土母质显著($p<0.05$)影响红壤黏粒含量。第四纪红黏土发育的红壤黏粒含量最高,其次为板页岩和砂岩风化物,三者之间差异不显著($p>0.05$),但均显著($p<0.05$)高于花岗岩风化

物发育的红壤。不同土地利用方式下红壤黏粒含量依次表现为:林地>旱地>园地>稻田,不同土地利用方式间差异不显著($p>0.05$)。



注:不同小写字母表示不同成土母质或土地利用方式间红壤有机质含量差异显著($p<0.05$)。下同。

图 4　成土母质和土地利用方式对红壤有机质含量的影响

Fig.4　Effects of parent materials and land use types on soil organic matter content of red soils

由表 2 可以看出,在稻田利用方式下,第四纪红黏土发育的红壤黏粒含量显著($p<0.05$)高于花岗岩发育的红壤。同样在林地利用方式,第四纪红黏土发育的红壤黏粒含量显著($p<0.05$)高于其他 3 种成土母质发育的红壤,且砂岩和花岗岩风化物发育的红壤黏粒含量显著($p<0.05$)高于花岗岩风化物发育的红壤。在不同成土母质发育的红壤中,土地利用方式对黏粒含量的影响不显著($p>0.05$)。双因素分析结果表明,仅有成土母质显著($p<0.05$)影响红壤黏粒含量,土地利用方式及其与成土母质的交互作用对黏粒含量的影响不显著($p>0.05$)。

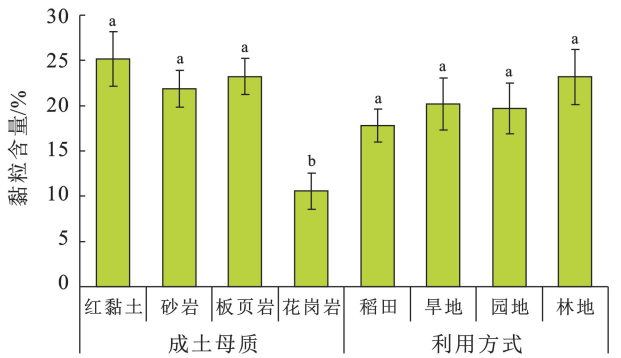


图 5　成土母质和土地利用方式对红壤黏粒含量的影响

Fig.5　Effects of parent materials and land use types on clay content of red soils

2.5　相关性分析

相关性分析表明(图 6),红壤抗蚀性指数和水稳性指数均与>0.25 mm 水稳性团聚体含量($WAS_{0.25}$),平均重量直径(MWD)和有机质含量存在显著($p<0.05$)的正相关关系,但与土壤黏粒含量相关性不显著($p>0.05$)。

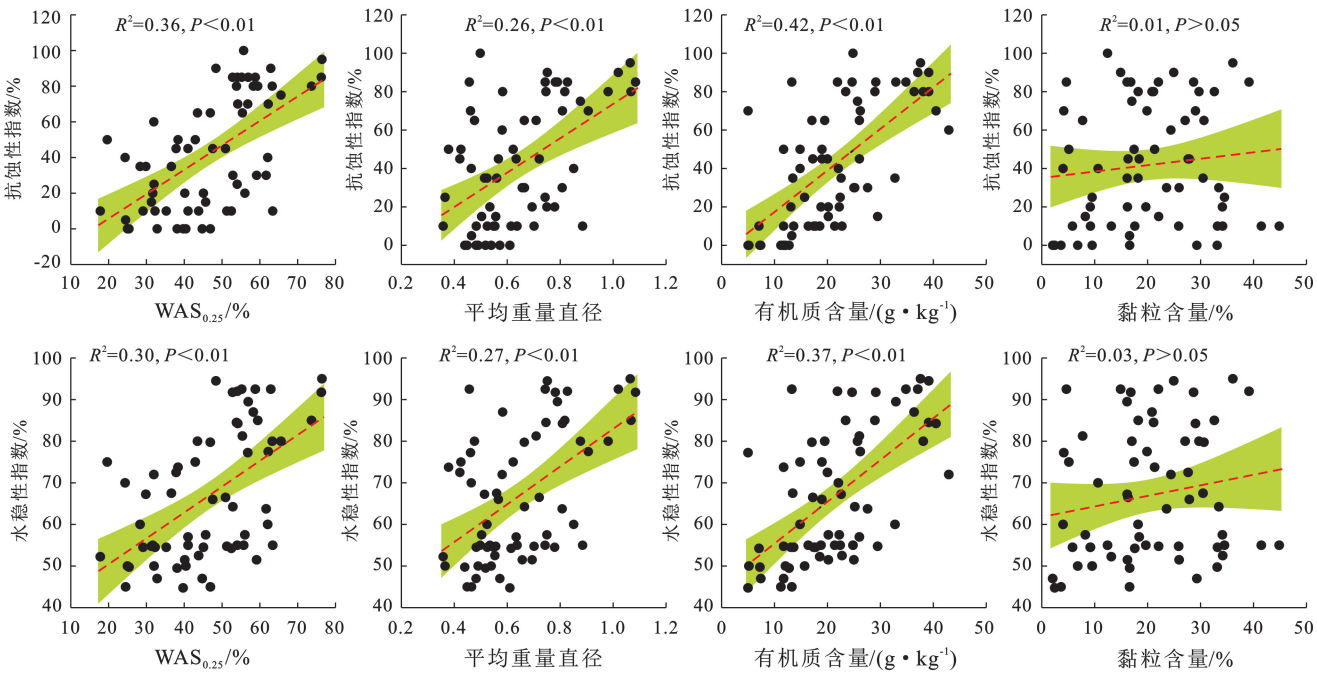


图 6　红壤抗蚀性指数和水稳性指数与水稳性团聚体稳定性和有机质含量的相关性($n=64$)

Fig.6　Correlation between erosion resistance index and water stability index and stability of water-stable aggregate and soil organic matter of red soil ($n=64$)

3　讨　论

土壤抗蚀性是土壤理化性质等各类指标的综合反映[15]。研究表明,土壤的理化性质指标与表征土壤抗蚀性的指标(抗蚀性指数、水稳性指数)具有显著的相关关系[8]。其中,土壤团聚体是土壤结构的重要

物质基础,其数量分布和空间排列方式决定了土壤孔隙分布、水力特性和水分渗透性,进而决定了土壤结构的稳定性及土壤抗侵蚀能力[13]。土壤有机质是土壤团聚体形成的主要有机胶结物质,不仅能够促进土壤颗粒胶结形成水稳性大团聚体,增强土壤结构的稳定性,还能够增加土壤的疏松度和透水性,从而提升土壤对抗水流侵蚀的能力[8]。多数研究将水稳性团聚体含量和有机质含量视为评价土壤抗蚀性的关键指标[19-20]。本研究结果也显示水稳性团聚体稳定性和有机质含量均与红壤抗蚀性指数和水稳性指数显著相关。

土壤自身理化特性的形成在很大程度上受内在因素成土母质的影响[21]。本研究发现花岗岩风化物发育的土壤黏粒含量显著低于其他 3 种成土母质发育的土壤,这与土壤质地对成土母质具有一定的继承性有关[21]。例如,第四纪红黏土发育的土壤具有质地黏重和富含铁铝氧化物的特点,而花岗岩风化物形成的土壤质地以砂粒为主[22]。由于土壤黏粒表面所携带的电荷具有吸附作用,可以吸附大量的有机碳,形成稳定的有机—无机复合体[23],成为土壤有机碳中稳定的碳库,从而有利于土壤有机质的长期积累。因此,多数研究认为,土壤有机碳含量随黏粒含量的增加而增加[24]。这可能也是本研究中第四纪红黏土、板页岩和砂岩风化物发育的红壤有机质含量显著高于花岗岩风化物发育的红壤的重要原因。尽管花岗岩风化物发育的红壤有机质和黏粒含量显著低于其他成土母质发育的红壤,但其 $WSA_{0.25}$ 含量与其他成土母质发育的红壤并无显著差异。其原因可能是除了土壤有机质和黏粒作为胶结剂影响团聚体的形成和稳定性外,不同成土母质发育的土壤黏粒中的黏土矿物成分差异也会影响黏粒间的物理化学分散和团聚体的物理崩解,进而影响团聚体的稳定性。有研究表明,不同类型的土壤黏粒形成的团聚体稳定性不同,含有蒙脱石(可膨胀的 2∶1 型黏土矿物)的土壤团聚体的物理崩解程度大于不含蒙脱石的土壤[25]。花岗岩风化物形成的红壤中黏土矿物以高岭石(非膨胀的 1∶1 型黏土矿物)为主,而第四纪红黏土、砂岩风化物等成土母质发育的红壤中黏土矿物含有相对较多的蛭石(可膨胀的 2∶1 型黏土矿物)[22]。在水稳性团聚体筛分过程中,土壤黏粒中的蛭石遇水膨胀,增强了团聚体的物理崩解程度,从而掩盖了有机质和黏粒对团聚体稳定性的促进作用。由于成土母质对土壤有机质、黏粒和水稳性团聚体等土壤理化特性的差异性影响,从而决定了其对土壤抗蚀性的影响程度。这是本研究中不同成土母质发育的红壤抗蚀性无显著差异的重要原因。此外,在本研究中,每种母质类型红壤均含有 4 种不同的土地利用方式,土地利用方式对不同母质类型红壤抗蚀性的影响存在差异,这可能也是成土母质对红壤抗蚀性影响不显著的重要原因之一。

本文中红壤旱地的抗蚀性指数和水稳性指数均显著低于其他 3 种土地利用方式,说明土地利用方式显著影响红壤的抗蚀性能。这主要与不同的土地利用方式土壤理化性质存在显著差异有关。红壤旱地种植作物类型多样,人为翻耕频繁,加快了土壤有机碳的矿化分解[26]。此外,红壤旱地主要分布于地形起伏相对较大的丘陵岗地部位,易遭受降雨径流冲刷,土壤颗粒和有机物质流失严重,导致土壤结构恶化,团聚体稳定性变差[27]。本研究中旱地土壤有机质含量、水稳性团聚体稳定性和黏粒含量均明显或显著低于其他土地利用方式,从而减弱了其抗蚀能力。姜兴雪等[7]通过对花岗岩红壤侵蚀退化不同治理模式的土壤抗蚀性研究发现,相对模拟旱地利用方式的开垦地,人工林治理和条沟草灌带等治理模式均可改善土壤结构和提升有机质含量,显著提高花岗岩红壤的抗蚀能力。与红壤旱地不同,红壤稻田的双季稻种植使其长期处于淹水厌氧环境,减弱了土壤有机碳的矿化速率,从而促进了土壤有机碳的积累[28],相应的提高了土壤颗粒间的胶结能力,进而增强了土壤抵抗水力侵蚀的能力。本研究的结果也显示稻田土壤的有机质含量显著高于其他土地利用方式。园地和林地受人为活动干扰相对较少,大量有机肥的投入(园地)和植被凋落物腐化分解(林地)使土壤有机质含量逐渐增加,进而促进了水稳性团聚体的形成和提高了土壤的抗蚀性[16]。

双因素方差分析结果表明,土地利用方式对红壤抗蚀性的影响程度显著强于成土母质。其原因可能在于土地利用方式对与抗蚀性密切相关的土壤理化性质的影响强度大于成土母质。土地利用方式作为人类利用土地的综合体现,其变化不仅可以改变地表植被覆盖和植物类型,还会改变养分投入、水分管理、耕作方式等人为管理措施,从而影响并改变土壤结构及其理化性状。本研究中土地利用方式显著改变了 $WSA_{0.25}$ 含量,MWD 和有机质含量,而这些指标均与土壤抗蚀性显著相关。相较而言,成土母质对具有母质继承性的土壤理化指标影响较大,比如 pH 值,黏土矿物、黏粒含量等[29-30]。本文结果也显示成土母质显著影响红壤黏粒含量,但黏粒含量与红壤抗蚀性的相关性并不显著。本研究还表明成土母质与土地利用方式的交互作用对红壤抗蚀性的影响不显著,这可

能与成土母质对红壤抗蚀性的影响不显著有关。因此,在红壤水土流失防治过程中,应以土地利用方式结构调整与优化为主,兼顾成土母质类型。此外,由于土壤结构状况和理化性状与土壤侵蚀程度密切相关[31],本研究中的不同样点在土壤样品采集时的土壤侵蚀程度并不相同,因此,本文结果仅能反映当前样点土壤的抗蚀性差异及土地利用方式和成土母质对其的影响程度,在后续的研究中应结合野外定点监测土壤流失量和外部侵蚀动力对土壤抗蚀性影响的研究[32],以全面评估土地利用方式和成土母质对红壤抗蚀性的影响。

4　结 论

(1) 土地利用方式显著影响红壤抗蚀性,其大小依次为:稻田>林地>园地>旱地,稻田、林地和园地红壤抗蚀性显著高于旱地。不同成土母质发育的红壤抗蚀性指数大小表现为:砂岩>第四纪红黏土>板页岩>花岗岩,但差异不显著。

(2) 土地利用方式显著改变了 $WSA_{0.25}$ 和有机质含量,成土母质对 $WSA_{0.25}$ 含量的影响不显著,但显著影响红壤有机质含量。

(3) 红壤抗蚀性和水稳性指数均与 $WSA_{0.25}$,MWD 和有机质含量呈显著正相关关系,与黏粒含量无显著相关性,表明土地利用方式和成土母质可通过改变这些土壤理化性状影响红壤抗蚀性。

(4) 土地利用方式和成土母质的交互作用对红壤抗蚀性的影响不显著。因此,在防治红壤侵蚀退化过程中,建议应以土地利用结构合理调整与布局为主,兼顾成土母质类型。

参考文献(References)

[1] 赵其国,王明珠,孙波,等.红壤物质循环及其调控[M].北京:科学出版社,2002.
Zhao Qiguo, Wang Mingzhu, Sun Bo, et al. Material Cycle of Red Soil and Its Regulation [M]. Beijing: Science Press, 2002.

[2] 孙波,蔡崇法,陈家宙,等.红壤退化阻控与生态修复[M].北京:科学出版社,2011.
Sun Bo, Cai Chongfa, Chen Jiazhou, et al. Control and Ecological Rehabilitation of Red Soil Degradation [M]. Beijing: Science Press, 2011.

[3] 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.
Bulletin on soil and water conservation in the first national water conservancy survey [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10):2-3.

[4] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.
Liu Baoyuan, Zhang Keli, Jiao Juying. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model [J]. Journal of Natural Resources, 1999,14(4):345-350.

[5] Nosrati K, Feiznia S, Van Den Eeckhaut M, et al. Assessment of soil erodibility in Taleghan drainage basin, Iran, using multivariate statistics [J]. Physical Geography, 2011,32(1):78-96.

[6] Mallick J, Al-Wadi H, Rahman A, et al. Spatial variability of soil erodibility and its correlation with soil properties in semi-arid mountainous watershed, Saudi Arabia [J]. Geocarto International, 2016,31(6):661-681.

[7] 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 Xingxue, Zha Ruibo, Mao Lanhua, 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.

[8] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报,2017,31(1):97-102.
Xie Xianjian, Li Yongfei. Degree of coupling relationship between anti-erodibility and soil factors of purple soil in different *Eucalyptus grandis* plantations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(1):97-102.

[9] 张杰,郑太辉,肖胜生,等.不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):115-122.
Zhang Jie, Zheng Taihui, Xiao Shengsheng, et al. Effects of different vegetative restoration patterns on soil chemical properties and corrosion resistance of soils derived from red sandstone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(24):115-122.

[10] Tazikeh H, Khormali F, Amini A, et al. Soil-parent material relationship in a mountainous arid area of Kopet Dagh basin, North East Iran [J]. Catena, 2017,152:252-267.

[11] Özdemir N, Aşkin T. Effects of parent material and land use on soil erodibility [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003,166(6):774-776.

[12] 章明奎,韩常灿.浙江省丘陵土壤的抗蚀性[J].浙江农业学报,2000,12(1):25-30.
Zhang Mingkui, Han Changcan. On antierodibility of hilly soils in Zhejiang Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2000,12(1):25-30.

[13] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用

类型土壤抗蚀性[J].水土保持学报,2019,33(5):50-57.
Zhang Huayu, Wang Keqin, Song Yali. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):50-57.

[14] 万怡国,谢方杰,陈晓安.红壤区不同水土保持措施对土壤抗蚀性的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):76-81.
Wan Yiguo, Xie Fangjie, Chen Xiaoan. Effects of different soil and water conservation measures on soil erosion resistance in red soil region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):76-81.

[15] 邱陆旸,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.
Qiu Luyang, Zhang Liping, Lu Fangchun, et al. Evaluation of forest soil anti-erodibility and influencing factors analysis based on entropy method [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):74-79.

[16] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40.
Sun Lili, Zha Xuan, Huang Shaoyan, et al. Experimental on soil anti-scouribility factors under different management modes in granite red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):34-40.

[17] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
Lu Rukun. Methods of soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[18] 张瑞虎,刘韬,黎兵.不同前处理方法和测量时间对泥炭中无机矿物颗粒粒度的影响[J].沉积学报,2011,29(2):374-380.
Zhang Ruihu, Liu Tao, Li Bing. Influence of different pretreatment procedures and measuring time on the mineral particle size of peaty sediments in the Yangtze Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2):374-380.

[19] Zhao Jinsong, Chen Shan, Hu Ronggui, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides [J]. Soil and Tillage Research, 2017,167:73-79.

[20] 高鑫宇,曾献奎,吴吉春,等.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[J].南京大学学报(自然科学),2018,54(1):185-195.
Gao Xinyu, Zeng Xiankui, Wu Jichun, et al. The study on soil moisture and organic matter content as well as their correlationships with soil anti-corrosion on typical slope of Doujia Mountain in Lanzhou [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018,54(1):185-195.

[21] 章明奎,何振立.成土母质对土壤团聚体形成的影响[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(3):198-202.
Zhang Mingkui, He Zhenli. Effect of parent matcrials on formation of soil aggregates [J]. Ecology and Environmental Sciences, 1997,6(3):198-202.

[22] 马玉翠.长期施肥处理下不同母质红壤黏土矿物组成及相关矿物的改性研究[D].江苏 南京:南京农业大学,2016.
Ma Yucui. Study on clay mineral composition of red soil with different parent materials and modification of related minerals under long-term fertilization treatment [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2016.

[23] Ramezanpour H, Kahneh E, Rasoli N. Land use effects on soil properties derived from various parent materials in northern Iran [J]. Asian Journal of Chemistry, 2010,22(9):6927-6935.

[24] Orgill S E, Condon J R, Conyers M K, et al. Parent material and climate affect soil organic carbon fractions under pastures in South-Eastern Australia [J]. Soil Research, 2017,55(8):799.

[25] Angst G, Messinger J, Greiner M, et al. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,122:19-30.

[26] Lado M, Ben-Hur M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss [J]. Applied Clay Science, 2004,24(3/4):209-224.

[27] Xia Yinhang, Chen Xiangbi, Zheng Xiaodong, et al. Preferential uptake of hydrophilic and hydrophobic compounds by bacteria and fungi in upland and paddy soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020,148:107879.

[28] Keiluweit M, Wanzek T, Kleber M, et al. Anaerobic microsites have an unaccounted role in soil carbon stabilization [J]. Nature Communications, 2017,8(1):1771.

[29] 胡丹丹,李浩,宋惠洁,等.长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系[J].土壤通报,2022,53(1):152-159.
Hu Dandan, Li Hao, Song Huijie, et al. The relationship between chemical structure of organic carbon and stability of aggregates in red soils under long-term fertilization [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1):152-159.

(下转第 101 页)

125(1):e2019JF005329.

[15] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]// Mckee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington, USA:U.S. Geological Survey Professional Paper, 1979.

[16] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. Geological Society of America Bulletin, 1914,25(1):655-744.

[17] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. Journal of Geology, 1922,30(5):377-392.

[18] 王涛.兰新高铁戈壁大风区风沙灾害形成机理及防治研究[D].北京:中国科学院大学,2018.
Wang Tao. Study on formation mechanism and prevention of sandstorm disaster in Gobi windy area of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.

[19] 张宏川,杨爱军,武开平.兰新线玉门段防护体系经济效益分析[J].中国沙漠,1998,18(4):390-393.
Zhang Hongchuan, Yang Aijun, Wu Kaiping. The economic effect of railway's protecting system at Yumen section of Lanzhou Xinjiang railway [J]. Journal of Desert Research, 1998,18(4):390-393.

[20] 王伟,宋彦宏.和田—若羌铁路戈壁盐碱区高立式"Z"字形沙障配置的风洞试验[J].水土保持通报,2024,44(2):50-56.
Wang Wei, Song Yanhong. Wind tunnel experimental study on actual setup of upright Z-shaped sand barriers in Gobi saline zone along Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):50-56.

[21] 丁雪宁.和田—若羌铁路大风沙区绿化林带配置的风洞模拟试验[J].水土保持通报,2024,44(4):257-264.
Ding Xuening. Wind tunnel simulation experiments on configuration of railway green belts in intensely blown sand areas of Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):257-264.

[22] Wang Tao, Qu Jianjun, Tan Lihai. Aeolian sediment transport over sandy Gobi: Field studies in the Nanhu Gobi along the Hami-Lop Nor railway [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023,11(1):125-134.

[23] 丁录胜.格库铁路芦苇把栅栏和大网格防沙体系防护效益[J].中国沙漠,2024,44(3):42-50.
Ding Lusheng. Observation and numerical simulation of the protective effect of the reed-bundle sand control system along the Golmud-Korla railway [J]. Journal of Desert Research, 2024,44(3):42-50.

(上接第 80 页)

[28] 陈洪松,岳跃民,王克林.西南喀斯特地区石漠化综合治理:成效、问题与对策[J].中国岩溶,2018,37(1):37-42.
Chen Hongsong, Yue Yuemin, Wang Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of south Western China: Achievements, problems, and countermeasures [J]. Carsologica Sinica, 2018,37(1):37-42.

[29] 史敏莉,罗为群,林佳欣,等.岩溶石山火龙果不同套种模式对土壤水稳性团聚体的影响[J].现代园艺,2023(9):59-60.
Shi Minli, Luo Weiqun, Lin Jiaxin, et al. Effects of different intercropping patterns of pitaya on soil water-stable aggregates in karst rocky mountain [J]. Contemporary Horticulture, 2023(9):59-60.

[30] 卢玉鹏,高柱,张小丽,等.果园生态系统复合经营的开展模式及生态机制综述[J].中国果树,2021(12):9-15.
Lu Yupeng, Gao Zhu, Zhang Xiaoli, et al. Review on the development model and ecological mechanism of compound management of orchard ecosystem [J]. China Fruits, 2021(12):9-15.

(上接第 90 页)

[30] 何腾兵,董玲玲,刘元生,等.贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J].水土保持学报,2006,20(6):157-162.
He Tengbing, Dong Lingling, Liu Yuansheng, et al. Change of physical-chemical properties and heavy mental element in soil from different parent material/rock [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(6):157-162.

[31] 何园球.红壤质量演变与调控[M].北京:科学出版社,2008.
He Yuanqiu. Evolvement and Regulation of Red Soil Quality [M]. Beijing: Science Press, 2008.

[32] 田培,刘嘉欣,曲丽莉.土壤可蚀性研究进展与展望[J].华中师范大学学报(自然科学版),2024,58(5):561-570.
Tian Pei, Liu Jiaxin, Qu Lili. Research progress and prospects on soil erodibility [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2024,58(5):561-570.