

DOI: 10.11766/trxb201901280036

张加子琦, 贾燕锋, 王佳楠, 齐曦, 王迪晨. 东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 590–599.
ZHANG Jiaziqi, JIA Yanfeng, WANG Jianan, QI Xi, WANG Dichen. Parameter Characteristics of Soil Erodibility of Long Gentle Slopes under Composite Erosion in the Black Soil Region of Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 590–599.

东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征*

张加子琦, 贾燕锋[†], 王佳楠, 齐曦, 王迪晨

(沈阳农业大学水利学院, 辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室, 沈阳 110866)

摘 要: 东北黑土区长缓坡耕地是土壤侵蚀的主要来源, 土壤可蚀性是影响土壤侵蚀的重要因素。以黑龙江省克山农场典型长缓坡耕地为研究对象, 在坡面上沿垄作方向从南向北选取 150 m 坡面, 分别于 2018 年 4 月和 9 月测定原状土的土壤剪切力, 同时取样应用 Le Bissonnais 法中的慢速湿润处理测定水稳性团聚体含量, 计算土壤团聚体平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和质量分形维数 (D), 分析黑土区长缓坡耕地的土壤可蚀性参数特征。结果表明: MWD、GMD、 D 、 >0.2 mm 土壤团聚体含量和剪切力在春季不同坡长大小顺序均表现为 $0\text{ m} > 30\text{ m} > 150\text{ m} > 60\text{ m} > 120\text{ m} > 90\text{ m}$; 秋季则总体上表现为 $30\text{ m} > 0\text{ m} > 150\text{ m} > 120\text{ m} > 60\text{ m} > 90\text{ m}$, 说明在坡中 60 m、90 m、120 m 处土壤抗蚀性较差, 并且随着土层深度增加土壤抗蚀性增大。秋季 MWD 值和 GMD 值分别为春季的 1.27 倍和 1.37 倍, >0.2 mm 土壤团聚体含量和剪切力秋季均高于春季, D 值春季高于秋季, 说明黑土区长缓坡面秋季土壤抗蚀性好于春季。水稳性团聚体各指标之间相关性显著, 与剪切力无显著性相关。土壤水稳性团聚体可作为评价土壤可蚀性的稳定指标, 剪切力评价土壤可蚀性影响程度低于水稳性团聚体指标, 具有不稳定性。研究结果可以为东北黑土区长缓坡耕地复合侵蚀防治提供科学依据。

关键词: 复合侵蚀; 土壤团聚体; 剪切力; 坡耕地; 东北黑土区

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Parameter Characteristics of Soil Erodibility of Long Gentle Slopes under Composite Erosion in the Black Soil Region of Northeast China

ZHANG Jiaziqi, JIA Yanfeng[†], WANG Jianan, QI Xi, WANG Dichen

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration in Liaoning Province, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objective】 Farmlands on long gentle slopes of black soil in Northeast China is the main source of soil erosion. Soil erodibility is an important factor affecting soil erosion. The soil erosion process in the black soil region of Northeast China is characterized by overlapping and/or coupling of wind-hydraulic-gravity-freeze-thaw, multiple in force and in process. In spring, freezing and thawing accompanies melting water, and temperature fluctuation and freezing and thawing are the dominant factors affecting soil properties, while in summer and autumn, water erosion is the main form of erosion and rainfall runoff and dry-wet

* 国家重点研发计划项目 (2016YFE0202900) 和国家自然科学基金项目 (41201263) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFE0202900) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41201263)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yanfengjia@syau.edu.cn.

作者简介: 张加子琦 (1993—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要从事黑土侵蚀规律研究。E-mail: 279076950@qq.com

收稿日期: 2019-01-28; 收到修改稿日期: 2019-06-06; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-08-12

alteration are the two leading factors. However, so far little has been reported in the literature about field experiments on soil erosion resistance in the black soil region under the multi-forced compound erosion, thus making it hard to effectively implement the task of controlling the multi-forced compound erosion. 【Method】 On a typical cultivated long gentle slope in the Keshan Farm in Heilongjiang Province, a 150 m long section of the slope was delineated along the same direction as the farmland ridges go from south to north. Soil samples were collected from the 0–30 cm soil layer of the slope at sampling sites 30 m apart along the slope. Soil shearing force of undisturbed soil was determined in April and September 2018. At the same time, the collected soil samples were analyzed for content of water-stable aggregates with the Le Bissonnais method via slow-setting and mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and mass fractal dimension (D) of the soil aggregates were measured in an attempt to characterize soil erodibility parameters of the long gentle slope of black soil. 【Result】 Results show that in terms of shearing force, MWD, GMD, D and content of >0.2 mm soil aggregates, the sampling sites exhibited a decreasing order of 0 m $>$ 30 m $>$ 150 m $>$ 60 m $>$ 120 m $>$ 90 m in spring, and generally an order of 30 m $>$ 0 m $>$ 150 m $>$ 120 m $>$ 60 m $>$ 90 m in fall, which indicate that the soils in the middle of the slope at 60 m, 90 m and 120 m are quite low in soil erosion resistance, and that the slope varies with position of the sampling site in strength of soil erosion, sediment transport and deposition. And soil anti-erodibility increases with soil depth. MWD and GMD is 1.27 times and 1.37 times as high in fall as in spring, respectively, and the content of >0.2 mm soil aggregates and shearing force is higher in autumn than in spring, but D is in a reverse trend, which suggest that the soil erosion resistance of the long gentle slope of black soil is higher in fall than in the spring. The correlations between the indices of water-stable aggregates were significant, but they have nothing to do with shearing force. Soil water-stable aggregates can be used as a stable index to assess soil erodibility. Shearing force is not so good when used as an index for the assessment because it is not stable, which is mainly attributed to its variability with soil properties, susceptible to and complex in change, especially under the influence of freeze-thaw erosion force. As the change of soil erodibility has certain uncertainties, it calls for further in-depth studies on impacts of soil shearing force on soil erodibility on long gentle slopes of black soil in Northeast China. 【Conclusion】 To control soil erosion in cultivated slopes of black soil in the region, focuses should be laid on adoption of erosion controlling practices in spring, like reducing length of the slope and adopting corresponding soil and water conservation measures in the middle of the slope. Soil water-stable aggregates can be used as a stable index in assessing soil erodibility in the black soil region of Northeast China. Shear force is not so good as soil water stable aggregates when used as index. The findings of this study may be used as a scientific basis for prevention and control of compound erosion in cultivated long gentle slopes of black soil in Northeast China.

Key words: Composite erosion; Soil aggregates; Shear force; Sloping cultivated land; Northeast black soil area

东北黑土有机质丰富，土壤肥力高，黑土区是中国重要的商品粮食基地之一。但是，自东北黑土区开垦以来，由于人为不合理的生产经营活动及自然条件等因素的影响，土壤侵蚀严重，土地生产力下降^[1]。黑土区地貌特点主要是山前波状起伏台地或漫岗地，坡度较缓，坡度一般为 $1^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ，坡长一般为 500~2 000 m，最长达 4 000 m^[2]。刘宝元等^[3]对东北松嫩黑土区农地水土流失监测结果表明，其水土流失面积占该区坡耕地面积的 77.54%，表明坡耕地是东北黑土区水土流失治理的重点。而现有黑土区坡面侵蚀影响因素的研究主要集中在坡耕地小区观测和降雨模拟试验，但目前对野外实地长缓坡耕地坡面侵蚀特征研究仍不够深入，且现有研究很

少涉及坡长因子。因此，长缓坡耕地的土壤侵蚀特征研究是防治东北黑土水土流失的关键。

土壤侵蚀是造成土壤退化的主要原因^[4]，土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀敏感程度和评价土壤应对外部侵蚀能力的重要指标，是影响土壤流失的内在因素，对研究坡面土壤侵蚀有着重要意义^[5-6]。土壤可蚀性具有时间和空间上的分异特征，具有明显的季节变化特征，且与地貌特征、微地形部位以及纵向的坡面分布等空间因素存在密切关系^[7]。Mutchler 和 Carter^[8]通过对美国缅因州径流小区研究发现土壤可蚀性存在季节性变化。东北黑土区土壤侵蚀过程风力—水力—重力—冻融多营力多过程重叠耦合特征明显^[9]。春季融水与冻融作用相伴，气温变化、

冻融交替作用是影响土壤性质的主导因子；在夏、秋季节以水力侵蚀为主要的侵蚀形式，降雨径流和干湿交替作用是影响土壤性质的主导因子，多营力复合侵蚀过程及效果不同于单一营力的侵蚀过程，冻融与水力、风力等外营力复合作用造成的土壤侵蚀问题远大于单一侵蚀营力本身的危害。目前，我国复合侵蚀的研究大多针对于黄土高原地区的风水复合侵蚀但针对东北黑土区多营力复合侵蚀的研究还是一片空白。土壤可蚀性的研究大多针对于单一的水力侵蚀，且维持在小区模拟试验。至今关于黑土区多营力复合侵蚀条件下的野外土壤抗蚀性试验研究还较为少见，也使得多营力复合侵蚀防治工作难以有效进行。

土壤可蚀性的大小受诸多因素影响，可由多种不同的内在土壤性质和外在侵蚀营力加以反映。尽管如此，土壤结构和土壤强度仍是表征土壤可蚀性最为重要的参数^[10]。土壤团聚体是土壤结构的基本单位，是土壤生态系统的综合参数^[11]，是侵蚀敏感性的有效指示因子^[12]。相关研究发现，土壤团聚体含量、团聚体大小、团聚体分形维数、平均质量直径、平均几何直径等均与土壤可蚀性显著相关，可作为表征土壤可蚀性的重要参数^[10, 13]。近年来，国内部分学者将土壤的力学性质引入到了土壤的抗蚀性研究之中，认为土壤抗剪强度可作为表征土壤可蚀性的重要参数，综合反映土壤对侵蚀动力的响应^[14-18]。虽然有越来越多的学者将目光聚焦于土壤可蚀性与土壤团聚体、土壤抗剪强度的相关性上，但是采用土壤团聚体和土壤剪切力综合表征土壤可蚀性，并与长缓坡面复合侵蚀形式相结合的研究工作还较少。鉴于此，本文选择黑龙江省克山县克山农场的长缓坡面为研究对象，采用 LB 团聚体测量法量化土壤团聚体特征，并测量原状土壤剪切力大小综合表征土壤可蚀性，揭示东北黑土区长缓坡面复合侵蚀营力对土壤可蚀性特征的影响，为减少黑土区长缓坡耕地水土流失提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省克山县黑龙江农垦总局克山农场（48.35157°N，125.4492°E）。克山县位于黑

龙江省西部，是小兴安岭伸向松嫩平原的过渡地带，地形起伏变化大，地势东北高西南低，地貌类型为波状起伏台地，丘陵漫岗地占 80%，境内有乌裕尔河、讷谟尔河、润津河等 5 条河流。属典型黑土区，主要土壤为黑土，土壤质地为粉壤土，平均耕层土壤容重为 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，有机质含量为 $26.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全氮含量为 $1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，pH 为 6.07。黑土层厚度约 30 cm，素有“黑土明珠”之称，截至 2015 年克山县耕地面积 $1\,467 \text{ km}^2$ ^[19]。由于地处中高纬度、欧亚大陆东岸，冬季严寒漫长，夏季短促、温热多雨，春季多风、少雨干旱，中温带大陆性季风气候特点明显：根据 1961—2004 年克山站气象资料统计，年均降水量 503 mm，2018 年降水主要集中在 6—9 月约占全年降水量的 80%，年均气温 1.9°C ，年均无霜期 124 d，年均日照时数 2 661 h，年均风速为 $2.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。黑龙江农垦总局克山农场开垦历史 50 多年，耕作深度约 30 cm，坡长约 2 200 m，多年来的耕作方式均为顺坡起垄耕作，采用秋季整地，春季点播播种的种植方式。主要农作物为玉米和大豆。

1.2 采样方法

土样采集于克山县克山农场一块典型漫川漫岗长缓坡耕地，土壤样品采集时间为 2018 年 4 月（播种前）和 2018 年 9 月末（秋收前），样地土壤未遭到人为破坏。鉴于东北黑土区典型长直型坡耕地坡面侵蚀强度均存在坡长为 142 m 的振荡周期^[20]，本研究选取坡长 150 m，在坡面上沿垄作方向从南向北在垄台上取样，每隔 30 m 为一个采样点，采样深度为 30 cm，每 10 cm 为一层，采用大饭盒直接扣入土中取原状土，将土样带回实验室，自然风干，全部土样过 3~5 mm 筛，用于测定水稳性团聚体含量，每个指标测定三组重复。在取团聚体土样时，用袖珍十字板剪力仪（WXSZB）直接测定坡面原状土的土壤剪切力；同时取样测定土壤含水率及容重。

1.3 测定方法

Le Bissonnais（LB）法主要依据土壤水稳性团聚体的不同破坏机制进行设计，针对不同的破坏机制共有三种相对独立的处理方式：快速湿润处理（Fast Wetting, FW），慢速湿润处理（SlowWetting, SW），机械振荡处理（Wetting Stirring, WS）。Kemper 和 Koch^[21]、Piccolo 等^[22]通过研究表明，慢速湿润处理（SW）主要依赖土壤黏粒的非均匀涨缩使团聚体遭到

破坏, 仅当土壤中含有大量具有膨胀性晶格的黏土矿物时, 这种破坏机制才会得以明显表达。薄层黑土胶体矿物以水云母类及蒙脱石矿物(2:1型具膨胀晶格矿物)为主, 可用慢速湿润处理法处理的水稳团聚体作为评价薄层黑土土壤团聚体稳定性的敏感性指标^[23]。所以, 本研究应用慢速湿润处理(SW)测定水稳性土壤团聚体。具体测定方法见相关文献^[24-25]。

1.4 计算方法

平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)由式(1)和式(2)计算:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \text{Exp} \frac{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (2)$$

式中, x_i 为土壤粒级的平均直径(mm); w_i 为不同土壤粒度团聚体占总团聚体的比例。

土壤团聚体分形维数计算公式如式(3)和式(4):

$$\frac{W(r < R_i)}{W_T} = \left[\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right]^{3-D} \quad (3)$$

两边取以 10 为底的对数:

$$\lg \frac{W(r < R_i)}{W_T} = (3-D) \lg \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \quad (4)$$

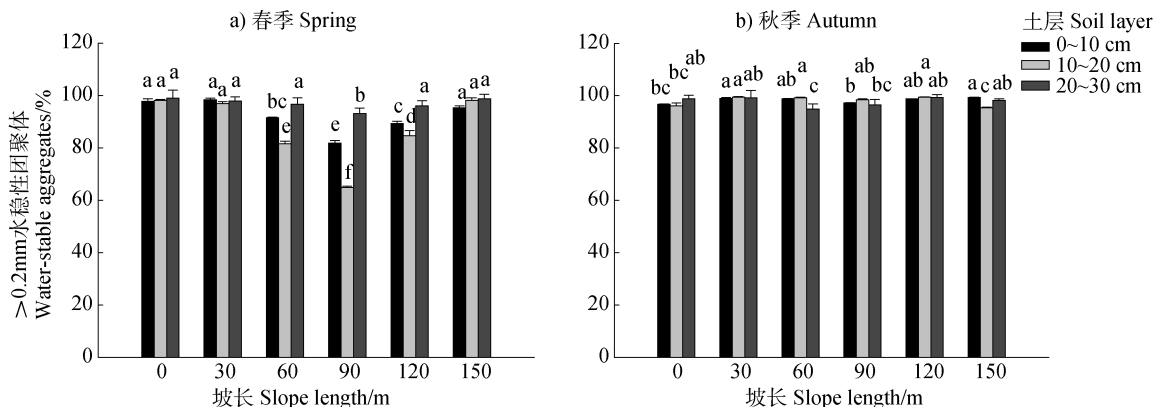
式中, D 为土壤水稳性团聚体各粒级分布的分形维数; W 为直径小于 R_i 累积质量; W_T 为总质量; R_i 为两相邻粒级 R_i 与 R_{i+1} 间土粒平均直径; R_{\max} 为最大粒级土粒平均直径^[26]。

所有实验数据采用 SPSS17.0 进行统计分析, 采用 LSD 法进行显著性相关性检验, 采用 SigmaPlot10.0 作图。

2 结果

2.1 >0.2 mm 水稳性团聚体特征

土壤团聚体作为土壤的重要组成部分, 一般以 0.25 mm 为界线将团聚体分为大团聚体, 许多研究将 >0.25 mm 水稳性团聚体含量作为土壤抗蚀性指标。本研究应用慢速处理法(SW)测定春、秋两季土壤大团聚体含量(图 1a、图 1b)。由于 LB 方法中没有 0.25 mm 粒级分级, 所以本研究将 >0.2 mm 水稳性团聚体含量, 记为 >0.2 mm。春秋两季土壤团聚体均以 >0.2 mm 的水稳性团聚体为主, 春季其变化范围在 64.94%~99.08%之间, 秋季其变化范围在 94.90%~99.47%之间, 大团聚体含量较高主要是由于克山农场采用秋耕的整地方式, 春季采用点播方式播种, 减少了耕作侵蚀, 春季采样后到秋季



注: 不同字母表示各个测定数据之间的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between the individual assay data. The same as below.

图 1 不同坡长和土层下 >0.2 mm 水稳性团聚体特征

Fig. 1 Properties of >0.2 mm water-stable aggregates

采样前地表扰动少,所以秋季 >0.2 mm 团聚体含量总体高于春季。春季 >0.2 mm 团聚体含量的大小顺序均为坡长 $0\text{ m}>30\text{ m}>150\text{ m}>60\text{ m}>120\text{ m}>90\text{ m}$, 秋季则无明显差异。不同土壤深度,春季 $10\sim 20$ cm 层 >0.2 mm 团聚体含量总体低于 $0\sim 10$ 、 $20\sim 30$ cm 层, $60\sim 120$ m 坡长的 $10\sim 20$ cm 层与其他不同坡长之间均呈显著性差异;秋季 30 m 坡长 $10\sim 20$ cm 层 >0.2 mm 团聚体含量最大, 60 m 坡长 $20\sim 30$ cm 层最小,不同土层之间总体上差异性不显著。

2.2 土壤结构和水稳性特征

土壤水稳团聚体是指土壤团聚体对于外来破坏性作用力的脆弱性的度量^[27]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,对土壤可蚀性具有显著影响。土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是评价土壤结构和水稳性的重要指标之一,二者变化趋势基本一致。MWD和GMD值越大表示团聚体的团聚程度越高,稳定性越好^[28]。春季MWD值范围为 $0.807\sim 1.608$ mm(图2a),GMD值范围为 $0.591\sim 1.481$ mm(图3a)。春季采样MWD值在 150 m坡长 $20\sim 30$ cm层最大, 90 m坡长 $10\sim 20$ cm层最小,除 90 m和 120 m坡长,MWD值均随土层加深而增大。MWD值除表层表现为坡长 $30\text{ m}>0\text{ m}$ 外,总体表现为坡长 $0\text{ m}>30\text{ m}>60\text{ m}>150\text{ m}>120\text{ m}>90\text{ m}$ 。GMD值除 90 m坡长 $10\sim 20$ cm层高于表层外,趋势与MWD值相同。说明 90 m和 120 m坡长团聚体的团聚度较低,土壤结构稳定性较差,土壤易受到侵蚀,土壤抗蚀性较差。这与王禹等^[20]通过

^{137}CS 和 $^{210}\text{Pbex}$ 复合示踪的方法对长直型坡耕地的侵蚀速率在 $90\text{ m}\sim 120\text{ m}$ 坡长侵蚀速率最大的结果相一致,表明土壤团聚体MWD值可表示坡面土壤可蚀性大小。

秋季采样MWD值最大值为 1.717 mm,最小值为 1.353 mm,分别出现在 30 m坡长 $10\sim 20$ cm层和表层。秋季MWD值范围为 $1.353\sim 1.717$ mm(图2b),GMD值范围为 $1.1912\sim 1.639$ mm(图3b)。MWD和GMD值总体均随土层深度增加而增加,秋季取样各层土壤MWD和GMD值较春季取样差距减小,坡长 30 m和 120 m处的 $10\sim 20$ cm和 $20\sim 30$ cm层的MWD和GMD值均表现为无显著性差异;MWD与GMD值总体趋势为坡长 $30\text{ m}>0\text{ m}>120\text{ m}\approx 150\text{ m}>60\text{ m}>90\text{ m}$,变化趋势与春季取样不同主要是由于二者侵蚀营力不同,降雨、径流作用下的水蚀,产生径流携带泥沙至 30 m坡长处产生沉积,导致秋季 30 m坡长处MWD值与GMD值较 0 m坡长处增大。春季与秋季的MWD和GMD值在不同坡长与土层下总体上均表现为显著性差异。总体上秋季MWD值为春季的 1.27 倍,秋季GMD值为春季的 1.37 倍,说明秋季坡面黑土土壤抗蚀性较春季土壤抗蚀性好。

2.3 土壤团聚体分形特征

分形维数 D 是评价土壤团聚体特征的更敏感且更准确的参数,土壤团聚体结构分形维数与土壤性质之间存在显著定量关系。随着土壤团聚体粒级的减小土壤分形维数增大,反之分形维数减小。且土

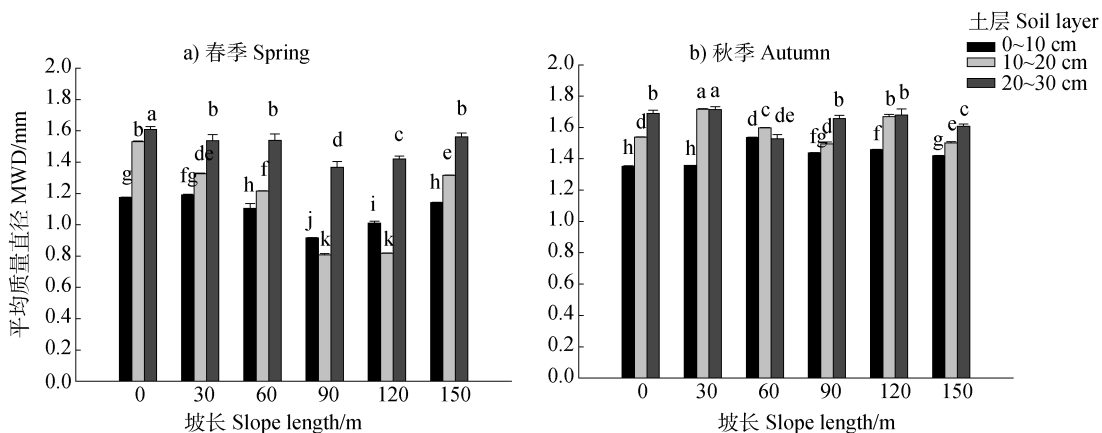


图2 平均质量直径(MWD)特征

Fig. 2 Characteristics of mean weight diameter (MWD)

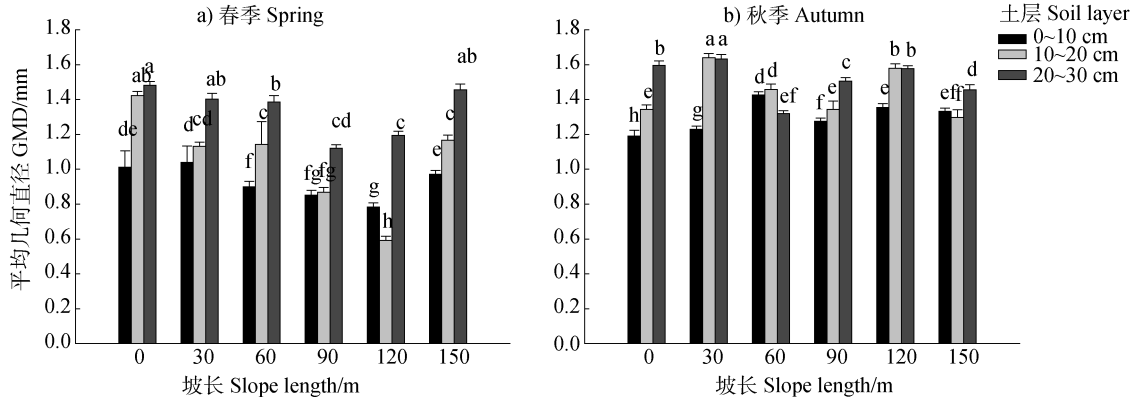


图3 平均几何直径特征

Fig. 3 Characteristics of geometric mean diameter (GMD)

壤扰动越大, 团聚体的分形维数越高, 分形维数越低, 则表征了相对越松散、通透性越好的土壤结构性状, 土壤团聚体粒度分布的分形维数能客观反映团粒结构特征和土壤紧实程度。春季土壤水稳性团聚体各粒度分布的质量分形维数 D 在 1.688~2.602 之间(图 4a), 秋季 D 在 1.483~2.142 之间(图 4b)。这与李阳兵等^[29]土壤团聚体粒径分布的分形维数介于 1.664~2.830 之间结论相近。由于春秋两季采集土样大多数点位 >0.2 mm 土壤团聚体均占各粒度含量总和的 90% 以上, 所以 D 较小, 说明土壤扰动较小。春季 D 除在 30 m、120 m 坡长的 10~20 cm 层高于 0~10 cm 层外, 其余点位均为 0~10, 10~20, 20~30 cm 层依次减小。各点位土层之间变化趋势基本相同, 总体 D 大小顺序为坡长 0 m < 30 m < 150 m < 60 m < 90 m < 120 m, 说明春季坡面土壤在 90 m、120 m 处扰动较大, 在 0 m 处扰动最小。除 0 m 与

30 m, 60 m 与 90 m 表层土壤 D 差异不显著外, 其他坡长之间均表现为显著性差异; 不同土层之间总体上均表现为显著性差异。

秋季 D 最大值在坡顶表层, 为 2.142。坡长 30 m 处 0~10 cm 层 D 值最大, 10~20 cm 和 20~30 cm 层 D 基本一致。总体上不同坡长与土层之间差异性显著。由于夏季到秋季的主要侵蚀营力为降雨在坡面产生径流和雨滴的打击, 因此在坡顶(0 m)处降雨对土壤产生的扰动较大, 由于径流携带泥沙会在一定产流后产生饱和, 因此在 30 m 坡长处产生轻微的泥沙沉积, 30 m 坡长非表层产生的土壤扰动较小。秋季 D 值在坡长 60 m 处 20~30 cm 土层高于 10~20 cm 土层, 120 m 坡长 20~30 cm 土层略高于 10~20 cm 土层, 150 m 坡长 10~20 cm 土层高于 0~10, 20~30 cm 土层外, 其余各点变化趋势与春季相同, 均为随土层增加 D 值逐渐减小, 总体变化趋

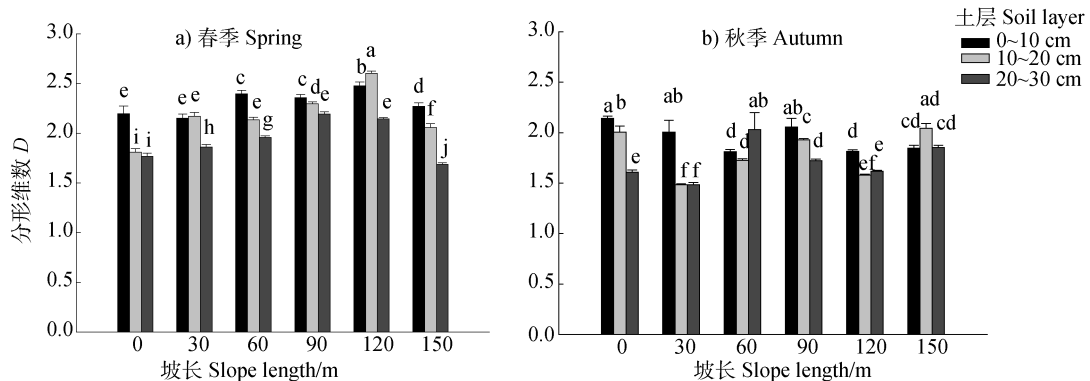


图4 不同坡长的分形维数特征

Fig. 4 Features of fractal dimension

势为坡长 $30\text{ m} < 0\text{ m} < 120\text{ m} < 150\text{ m} < 60\text{ m} < 90\text{ m}$ 。个别点位土层 D 值差异与春季不同的原因为秋季坡面上的植物根部对土壤造成了影响,而春季坡面为裸地。

春秋两季土壤各坡位分形维数 D 、 $>0.2\text{ mm}$ 团聚体、MWD、GMD 变化趋势相同,春季总体表现为 $0\text{ m} > 30\text{ m} > 150\text{ m} > 60\text{ m} > 120\text{ m} > 90\text{ m}$; 秋季不同坡长总体表现为 $30\text{ m} > 0\text{ m} > 150\text{ m} > 120\text{ m} > 60\text{ m} > 90\text{ m}$ 。说明此坡耕地坡面上土壤团聚体在坡上团聚度高扰动小,而坡中土壤团聚度低扰动大,坡下土壤团聚度扰动程度介于二者之间。这与阎百兴和汤洁^[30]的研究发现顶部侵蚀较轻,坡中部侵蚀强烈的结论相一致。

2.4 土壤剪切力特征

土壤剪切力综合反映土壤对侵蚀动力的响应,土壤抗剪强度是土体抵抗剪切破坏的极限强度,其大小反应了土体在外力作用下发生剪切破坏的难易程度,可表征土壤抗蚀性大小。本文通过土壤团聚体水稳定性和土壤剪切力综合表征土壤可蚀性。春季土壤 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 层平均土壤含水

率分别为 15.95%、28.62%、28.90%; 秋季土壤 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 层平均土壤含水率分别为 19.32%、37.82%、36.90%。除春季 30 m 和 90 m 坡长处 $10\sim 20\text{ cm}$ 层土壤含水率高于 $0\sim 10\text{ cm}$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 层外,春季(图 5a)、秋季(图 5b)其他坡长处土壤剪切力均随深度增加而增大,这与潘欣等^[31]研究的在同一坡面整地措施下,临界剪切力随土壤深度增加而增大的结论一致。土壤表层抗剪切力差异不显著, $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 总体均表现为显著性差异。春季不同坡长土壤剪切力总体大小顺序为 $90\text{ m} > 30\text{ m} > 120\text{ m} > 60\text{ m} > 150\text{ m} > 0\text{ m}$ 。秋季不同坡长土壤剪切力大小顺序为 $150\text{ m} > 120\text{ m} > 90\text{ m} > 30\text{ m} > 0\text{ m} > 60\text{ m}$ 。春季与秋季剪切力差别主要是由于两季土壤含水率和容重不同。通过对 $>0.2\text{ mm}$ 团聚体、MWD、GMD、 D 值春秋两季研究发现秋季土壤团聚体的稳定性和团聚度,剪切力值均高于春季,表层差异性不明显。这与 Mutchler 和 Carter^[8]在美国缅因州分析径流小区 6 年的观测数据得出的土壤可蚀性 2 月达到最高值,为年均土壤可蚀性的 169%, 8 月达到最低值,为年均可蚀性的 31% 结论相一致。

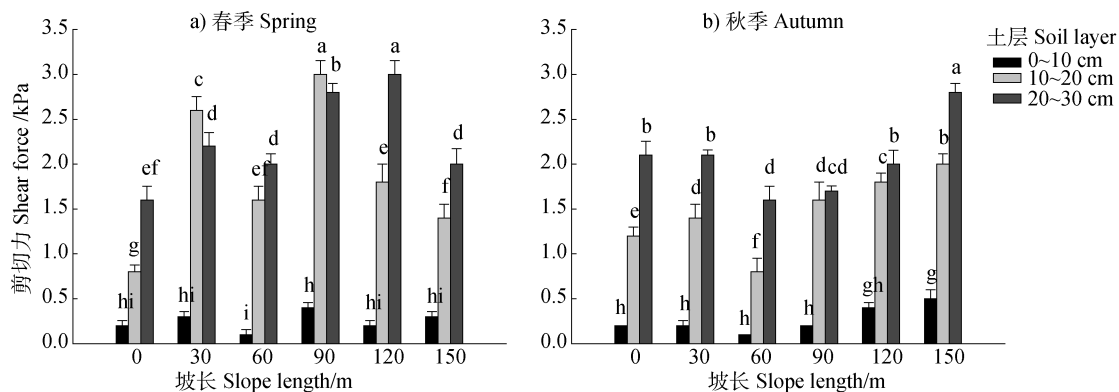


图 5 不同坡长和土层的土壤剪切力特征

Fig. 5 Feature of soil shearing force

2.5 土壤水稳性团聚体指标与土壤剪切力相关性

春季 MWD 值与 GMD、 $>0.2\text{ mm}$ 土壤团聚体含量均呈极显著正相关,与 D 呈极显著负相关,与剪切力无显著相关性; GMD 值与 D 呈极显著负相关,与 $>0.2\text{ mm}$ 土壤团聚体呈显著性正相关,与剪切力相关性不显著; D 与 $>0.2\text{ mm}$ 土壤团聚体含量呈显著负相关; 剪切力与 $>0.2\text{ mm}$ 团聚体含量无显著相关性(表 1、表 2)。团聚体各指标间相关性良好,与剪切力均未达到显著相关。以上各指标相关分析

可以得出春季 $>0.2\text{ mm}$ 水稳性土壤团聚体、GMD、MWD 和 D 值均能作为评价黑土区长缓坡面土壤侵蚀的关键评价指标,朱显谟等^[32]指出土壤透水性是影响土壤侵蚀的主要原因,分形维数 D 则可表征土壤通透性的土壤结构性状。而 $>0.2\text{ mm}$ 团聚体、GMD 和 MWD 值则可表征土壤团聚度,土壤团聚度越高土壤抗蚀性越好。土壤剪切力基于土壤侵蚀动力评价指标,土壤的容重、结构、含水率、孔隙度等因素均能影响土壤剪切力,土壤性质与抗剪强度的关

系研究表明, 存在一个最适土壤含水率使土壤抗剪强度最大, 过大或过小抗剪强度均会降低^[33]。而春季影响土壤可蚀性主要营力为冻融侵蚀, 东北黑土区春季日温差变化较大, 冻融作用和融雪可以改变土壤结构、容重和土壤含水率, 土壤在一天内可能经过多次冻融循环, 由于影响土壤剪切力因素复杂, 所以在春季土壤剪切力不能作为黑土区长缓坡面土壤侵蚀的关键评价指标。

秋季 MWD 与 GMD 呈极显著正相关, 与 D 呈极显著负相关, 与剪切力呈显著性正相关, 与 >0.2 mm 无显著相关; GMD 值与 D 呈显著性负相关, 与 >0.2 mm 呈显著性正相关, 与剪切力呈显著性相关; D 与 >0.2 mm 呈极显著负相关, 与剪切力无显著相关性; >0.2 mm 与剪切力无显著相关性。说明 MWD、GMD、 $D>0.2$ mm 团聚体具有显著性相关, 水稳性团聚体 MWD 和 GMD 与剪切力具有相关性。

与春季相同, 秋季 >0.2 mm 水稳土壤团聚体、GMD、MWD 和 D 均能作为评价黑土区长缓坡面土壤侵蚀的关键评价指标。秋季影响土壤可蚀性主要营力为水力侵蚀, 在同一区域内影响土壤剪切力主要因素为土壤孔隙度、土壤含水率, 相关研究表明土壤含水量与剪切力呈线性变化, 所以秋季土壤剪切力作为评价黑土区长缓坡面土壤侵蚀的评价指标较差, 且剪切力评价土壤可蚀性指标影响程度低于水稳性团聚体指标。

3 结 论

通过测定 >0.2 mm 水稳性团聚体、MWD、GMD、分形维数和土壤剪切力均表明黑土区长缓坡面秋季土壤抗蚀性好于春季土壤。在坡长 150 m 的黑土区长缓坡面, 在坡中 60 m、90 m、120 m 处土

表 1 春季水稳性团聚体指标与剪切力的相关性

Table 1 Correlation between water-stable aggregates index and soil shearing force in spring

春季采样 Spring sampling	平均质量直径 MWD/mm	平均几何直径 GMD/mm	分形维数 D	>0.2 mm 团聚体 Agglomerate/%	剪切力 Shear force/kPa
MWD/mm	1				
GMD/mm	0.957**	1			
D	-0.895**	-0.974**	1		
>0.2 mm 团聚体 Agglomerate/%	0.755**	0.589*	-0.539*	1	
剪切力 Shear force/kPa	0.267	0.3	-0.251	-0.184	1

表 2 秋季水稳性团聚体指标和剪切力的相关性

Table 2 Correlation between water-stable aggregates index and soil shearing force in autumn

秋季采样 Autumn sampling	平均质量直径 MWD/mm	平均几何直径 GMD/mm	分形维数 D	>0.2 mm 团聚体 Agglomerate/%	剪切力 Shear force/kPa
MWD/mm	1				
GMD/mm	0.977**	1			
D	-0.909**	-0.969**	1		
>0.2 mm 团聚体 Agglomerate/%	0.447	0.609**	-0.686**	1	
剪切力 Shear force/kPa	0.579*	0.471*	-0.336	-0.011	1

注: **0.01 水平上显著相关, *0.05 水平上显著相关。Note: **Correlation is significant at the 0.01 level, * correlation is significant at the 0.05 level.

壤抗蚀性较差,主要是坡面不同坡长部位土壤侵蚀、搬运和沉积作用强弱不同造成的。在不同土层深度上春秋两季均表现为随着土层深度增加,土壤抗蚀性越好。土壤水稳性团聚体可作为评价黑土区长缓坡面土壤可蚀性的稳定指标,而剪切力评价土壤可蚀性影响程度低于水稳性团聚体指标,土壤剪切力稳定性较差,主要由于土壤剪切力随土壤特性发生变化,特别是在冻融侵蚀营力的影响下土壤特性变化复杂,土壤可蚀性的变化具有不确定性,土壤剪切力对黑土区长缓坡耕地土壤可蚀性的影响研究尚待深入。通过以上结论说明黑土区长缓坡面春季主要侵蚀营力冻融侵蚀对土壤可蚀性影响大于秋季水力侵蚀。为更好的保护黑土区土壤资源提出以下防治建议:黑土区坡耕地土壤侵蚀重点应侧重于春季,采取相应的水土保持措施。要减少长缓坡耕地的土壤侵蚀,应在坡中部采取水土保持措施。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Chinese soil erosion and ecological security: Northeast Black Soil Volume[M]. Beijing: Science Press, 2010: 77, 148. [水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 东北黑土卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 77, 148.]
- [2] Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (2): 66—70. [范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (2): 66—70.]
- [3] Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6 (1): 1—8. [刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6 (1): 1—8.]
- [4] Dai Y C, Yang X Q, Zhang Z G, et al. Causes of soil degradation in heilongjiang province and its impact on agriculture[J]. Modernizing Agriculture, 2017(10): 13—17. [代云超, 杨晓强, 张志国, 等. 黑龙江省土壤退化成因及其对农业的影响[J]. 现代化农业, 2017(10): 13—17.]
- [5] Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (1): 7—13. [张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44 (1): 7—13.]
- [6] Li X, Wang H Y, Yang X J, et al. Study on soil erodibility K value of near natural forests in northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34 (4): 5—10. [李旭, 王海燕, 杨晓娟, 等. 东北近天然林土壤可蚀性K值研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 5—10.]
- [7] Wei H, Zhao W W, Wang J. Review of soil erodibility research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (8): 2749—2759. [魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (8): 2749—2759.]
- [8] Mutchler C K, Carter C E. Soil erodibility variation during the year[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1983, 26: 1102—1104.
- [9] Zhang K L, Liu H Y. Research progress and prospect of freeze-thaw erosion in black soil region of northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16 (1): 17—24. [张科利, 刘宏远. 东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16 (1): 17—24.]
- [10] Nciizah A D, Wakindiki II C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61 (6): 827—842.
- [11] Juan L I. The influence of different land use manners on soil aggregate characteristics of consolidation and returning to field in hollow village of hilly area[J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9 (10): 26—32.
- [12] Hou X J, Yang J S, Wang X P, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (4): 818—827. [侯晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报, 2015, 52 (4): 818—827.]
- [13] Ding W F, Zhang X C. An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13 (5): 831—843.
- [14] Zhong S Q, Liu B, Wei C F, et al. The rock fragments (< 2 mm) and their action mechanism on the shear strength of purple mudstone-developed soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 (23): 4846—4858. [钟守琴, 刘波, 魏朝富, 等. 紫色泥岩土壤<2 mm 岩屑及其对抗剪强度的作用机制[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (23): 4846—4858.]
- [15] Lei J, Zhang G M, Liu L Y, et al. Measuring soil shear strength and impact factors[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52 (4): 486—492. [雷洁, 张国明, 刘连友, 等. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52 (4): 486—492.]
- [16] Zhong R H, Lü F Y, Bao Y H, et al. Impacts of several grasses on soil physical properties in the riparian zone of Three Gorges reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation Research, 2018, 25 (1): 17—22. [钟荣

- 华, 吕发友, 鲍玉海, 等. 三峡水库 消落带草本植物对若干土壤物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (1): 17—22.]
- [17] Zhang S, Xiong D H, Zhang B J, et al. Soil erosion resistance under dry-wet alternation in different layers of dry-hot valley region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47 (12): 152—159, 212. [张素, 熊东红, 张宝军, 等. 干湿交替下干热河谷冲沟不同土层的抗侵蚀性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (12): 152—159, 212.]
- [18] Li Q, Liu G B, Xu M X, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (10): 153—159. [李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (10): 153—159.]
- [19] Liu X J, Yan X J. Effects of hedgerow strip on anti-erodibility in the black soil region of northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1214—1219. [刘绪军, 延秀杰. 黑土区植物篱带对土壤抗蚀性作用效果研究[J]. 土壤通报, 2018, 49 (5): 1214—1219.]
- [20] Wang Y, Yang M Y, Liu P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated slope[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24 (1): 98—103, 87. [王禹, 杨明义, 刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. 核农学报, 2010, 24 (1): 98—103, 87.]
- [21] Kemper W D, Koch E J. Aggregate stability of soils from western U.S. and Canada[J]. Soil Science, 1966, 146: 317—325.
- [22] Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability[J]. Geoderma, 1997, 75 (3/4): 267—277.
- [23] Zhang X C, Zheng F L, Wang B, et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slope land with different reclamation years in black soil region[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2011, 39 (5): 90—95. [张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011, 39 (5): 90—95.]
- [24] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47 (4): 425—437.
- [25] Le Bissonnais Y, Arrouays D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents[J]. European Journal of Soil Science, 1997, 48 (1): 39—48.
- [26] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by particle size distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (20): 1896—1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1899.]
- [27] Hillel D. Environmental Soil Physics[M]. London, UK: Academic Press, 1998.
- [28] Zhang S Q, Wang P P, Wang C Q, et al. Influence of different tobacco planting years on soil aggregate stability and related factors. Soils, 2017, 49 (6): 1229—1236. [张世祺, 王沛裴, 王昌全, 等. 不同植烟年限对土壤团聚体稳定性的影响及其相关因素分析. 土壤, 2017, 49 (6): 1229—1236.]
- [29] Li Y B, Wei C F, Xie D T, et al. The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on Karst mountain areas[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37 (1): 51—55. [李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37 (1): 51—55.]
- [30] Yan B X, Tang J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion[J]. Geographical Research, 2005, 24 (4): 499—506. [阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响[J]. 地理研究, 2005, 24 (4): 499—506.]
- [31] Pan X, Wang Y Q, Gao Y, et al. Effects of engineering measures on soil shear characteristics in Shixia small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (6): 314—318. [潘欣, 王云琦, 高勇, 等. 石匣小流域整地措施对土壤剪切性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (6): 314—318.]
- [32] Zhu X M, Zhang X L, Lei W J. Soil erosion phenomenon and its evolution in the Weihe river basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 1954, 2 (4): 209—222. [朱显谟, 张相麟, 雷文进. 泾河流域土壤侵蚀现象及其演变[J]. 土壤学报, 1954, 2 (4): 209—222.]
- [33] Chen G F. Experimental study on the influence of water content on the shear strength of unsaturated soils[C]. Engineering Geology Committee of China Geological Society. Proceedings of the Ninth National Engineering Geology Conference. Engineering Geology Committee of China Geological Society: Editorial Department of Journal of Engineering Geology, 2012: 5. [陈高峰. 含水率对非饱和土抗剪强度影响试验研究[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会. 第九届全国工程地质大会论文集. 中国地质学会工程地质专业委员会: 工程地质学报编辑部, 2012: 5.]

(责任编辑: 檀满枝)