

黄土高原水蚀风蚀交错带典型土壤的⁷Be 分布特征

殷敏峰¹, 汤耀¹, 张加琼^{1,2}, 杨明义^{1,2}, 邓鑫欣¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了明确⁷Be 示踪黄土高原水蚀风蚀交错带不同类型土壤侵蚀(风蚀和水蚀)的可行性,以该区域的典型土壤(粉壤土、粉黏土、沙壤土和风沙土)为对象,通过分析⁷Be 的土壤剖面分布特征、张弛质量深度及其季节变化,明确了在该区域不同类型土壤中的分布特征。结果表明:⁷Be 在土壤剖面的分布受土壤类型和季节变化的影响。对不同类型的土壤,无论风季还是雨季,土壤中⁷Be 的分布特征均与土壤黏粒含量密切相关,反映⁷Be 在土壤剖面分布特征的关键参数土壤张弛质量深度 h_0 与黏粒含量呈明显线性负相关关系($R^2 > 0.87$)。此外,4 种土壤的 h_0 均表现为风季大于雨季。由于该区域明显的风水侵蚀季节分异,为运用⁷Be 示踪技术区分风力和水力的影响提供了可能。然而,对黏粒含量较低的风沙土,其侵蚀速率较大且侵蚀特征明显异于其他 3 种土壤,尤为突出的是水蚀过程中常表现出明显的重力侵蚀特征。可见,⁷Be 可用于示踪粉壤土、粉黏土和沙壤土的风水交错侵蚀,而在风沙土中的适用性较差。

关键词:⁷Be 示踪技术; ⁷Be 剖面分布特征; 张弛质量深度; 风水交错侵蚀

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0001-07

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.001

Distribution Characteristics of Beryllium-7 in Representative Soil Types in the Wind-Water Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau

YIN Minfeng¹, TANG Yao¹, ZHANG Jiaqiong^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}, DENG Xinxin¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the feasibility of beryllium-7 to soil erosion study for different types of soils in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau, we analyzed seasonal variation of beryllium-7 distribution in soil profile, and the relaxation mass depth of four typical local soils (silty clay, sand, sandy loam and soil loam). Results show that beryllium-7 distribution in soil profile is affected by both soil type and seasonal variation, and is closely related with soil clay content regardless of variation of windy and rainy seasons. The soil relaxation mass depth as one of the key factors for beryllium-7 distribution in soil profile is negatively linearly correlated with the clay content ($R^2 > 0.87$). Moreover, the soil mass relaxation depth is greater in dry season compared to rainy season for all studied soil types, which results in feasibility of beryllium-7 measurements for soil wind and water erosion study in this multiple agents affecting region supporting by local obvious separate of dry and rainy season. However, higher erosion rate and characteristics of sandy soil with the high sand fraction are significantly disparate from those of the other 3 types of soils, particularly. gravity erosion characteristics of sandy soil obviously presents in water erosion process. Therefore, beryllium-7 measurement is suitable for tracing wind and water erosion of all three soil types, and is hardly suitable for tracing wind and water erosion of sandy soil.

Keywords: beryllium-7 measurements; beryllium-7 distribution in soil profile; relaxation mass depth; wind-water erosion crisscross region

收稿日期:2020-06-06

修回日期:2020-09-12

资助项目:国家自然科学基金(41671281);国家重点研发计划(2016YFE0202900);美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23060502)

第一作者:殷敏峰(1998—),男,江西九江人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:yinmf1998@nwfau.edu.cn

通信作者:张加琼(1984—),女,四川小金人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:jqzhang@nwfau.edu.cn

黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区之一,其中水蚀风蚀交错带受风力和水力交错作用,土壤侵蚀强烈,成为黄土高原侵蚀最严重的区域,加之该区地面物质组成复杂,即使在水土保持工程持续大规模实施的背景下,该区域仍是黄河下游河床泥沙的重要来源地^[1-6]。针对该区域的风水交错侵蚀特征,深入研究土壤侵蚀的过程与机理,揭示土壤侵蚀的变化规律,为科学防治水土流失提供科学依据。前人采用 3S、野外调查、核素示踪、小区观测、模拟试验等方法对该区域的土壤侵蚀开展了大量研究,并取得了丰硕的成果^[7-10]。然而该区土壤侵蚀过程复杂且全年活跃,限制了传统方法在该区土壤交错侵蚀研究中的应用,而核素示踪技术,尤其是半衰期较短的天然放射性核素⁷Be,对示踪该区的土壤交错侵蚀具有独到优势^[11]。

⁷Be 的沉降特征为其示踪短期土壤侵蚀提供了可能。⁷Be 是具有连续来源的天然放射性核素,经干、湿沉降到地表后,迅速与地表土壤颗粒吸附,在土壤中的分布和含量均较稳定^[12]。⁷Be 半衰期较短(53.3 d),导致其在土壤中的分布深度较小且无法长期蓄存。⁷Be 主要分布在土壤表层 0—20 mm 内,尤其在 0—2 mm 内含量最高,其含量随土层深度增加一般呈指数递减^[13]。⁷Be 的上述基本特征不仅使其适用于短期土壤侵蚀示踪,也为运用其区分交错侵蚀区域的风蚀、水蚀提供了准确、便利的方法。可见,明确⁷Be 在土壤中的背景分布特征是利用⁷Be 示踪土壤交错侵蚀的基础。

⁷Be 的土壤剖面分布特征可用其面积浓度(Bq/m²)或质量浓度(Bq/kg)随土层深度的变化、质量深度(kg/m²)等描述。前人对⁷Be 的土壤剖面分布特征开展了大量研究并取得丰硕成果。在国内外不同区域的研究表明,⁷Be 集中分布在表层 0—20 mm 或者 0—30 mm 土壤中,未扰动土壤中其基本呈现随土层深度增加的指数递减规律^[12-13]。⁷Be 在土壤剖面中的分布主要受降雨、纬度、海拔、土壤质地、土壤入渗能力等因素的影响^[14-15]。首先,⁷Be 主要是通过湿沉降到达地表,降水状况直接决定土壤中⁷Be 的含量^[16]。因而,影响降雨的因素,包括地理纬度、海拔等都会对土壤中的⁷Be 含量造成影响。⁷Be 沉降通量与降雨量存在密切的相关性,前人研究发现可用线性函数表达^[14]。纬度的影响表现为中高纬度地区高于低纬度地区,同一纬度降雨多的地区沉降通量大^[17]。如黔中地区⁷Be 背景值为 263 Bq/m²,较陕西安塞地区⁷Be 背景值 392 Bq/m²要低,而比四川盐亭地区⁷Be 背景值 143.2 Bq/m²要高^[18-22]。其次,土壤中⁷Be 含量受土壤质地的

影响。随土壤颗粒粒径变小而变少,相较于粗颗粒,在土壤组分较细、有机质含量较高、黏粒含量较多的条件下往往可以检测到较高的⁷Be 含量。研究表明细组分和有机质的增加可导致土壤负电荷增多,使得细颗粒对⁷Be 的吸附能力变强,不同粒径大小土壤中⁷Be 含量分布规律为黏粒>粉砂粒>沙粒^[23]。除上述原因外,土壤入渗也影响⁷Be 的剖面分布,对于美国沼泽土和中国三峡库区紫色土的研究均表明,在土壤未饱和的情况下,雨水的快速下渗会导致⁷Be 向更深的土壤剖面分布^[24-26]。目前大多研究均聚焦于单一外营力(水力为主,风力较少)背景下的⁷Be 剖面分布特征、描述函数影响因素等^[27],而对风力、水力交错条件下⁷Be 特征的研究薄弱。

明确水蚀风蚀交错带⁷Be 在不同土壤类型的背景分布特征,是运用该方法研究该区域交错侵蚀的基础。本研究基于土壤中⁷Be 仅分布在土壤表层且呈指数递减的特点,在陕西省榆林市神木县六道沟流域建立当地 4 种典型土壤(粉壤土、粉黏土、沙壤土和风沙土)的⁷Be 背景值观测小区,观测风季(10 月—次年 5 月)和雨季(5—10 月)的⁷Be 背景值含量、剖面分布特征,分析其张弛质量深度,明确不同类型土壤的⁷Be 分布特征,为运用⁷Be 示踪该区域的土壤交错侵蚀研究提供依据。

1 研究区概况

本研究在神木六道沟流域通过建立观测小区的方式开展,小区位于陕西省神木县六道沟小流域(110°21′—110°23′E, 38°46′—38°51′N),海拔 1 094.0~1 273.9 m。六道沟小流域位于毛乌素沙漠边缘地带,属于典型的盖沙黄土丘陵地貌,是黄土高原水蚀风蚀交错带比较典型的区域。该流域面积为 6.9 km²,主沟道总长 4.21 km,自南而北流入窟野河一级支流三道沟。气候类型为半干旱大陆性季风气候。年均气温 8.4℃,多年平均降水量为 437 mm,年际变化较大,其中 6—9 月份的降水占全年降水量的 77.4%,且多以暴雨形式出现。当地主风向为西北,次主风向为东南,东风最弱,夏季多为南风、东南风,冬春两季多为偏北风^[3-5],大风日数年均 13.5 d,最多达 44 d,年均沙尘暴日数 11.5 d,最多达 22 d。

2 试验布设与样品采集处理

2.1 试验布设

选取背风、地势平坦、无植被覆盖的区域修建⁷Be 背景值小区共计 4 个,使用高 1 m 左右的石棉瓦围封

(1.5 m×1.5 m)以保证小区内土壤无流失、无沉积。为避免因为周围立地条件的差异造成土壤接收的⁷Be的差异,将背景值小区修建在同一区域,并在小区里填装不同的土壤(粉壤土、粉黏土、沙壤土和风沙土)约50 cm,填装土壤时使其容重接近翻耕条件下该种

土壤的自然容重,作为⁷Be背景值、剖面分布特征及其张弛质量深度的研究区(图1)。同时,在试验站内布设10个底部带孔的不锈钢桶,分别填装从研究区采集的上述土壤,每种土壤装2个桶,每个桶装20 cm左右的土壤,用于校正野外的⁷Be背景值。

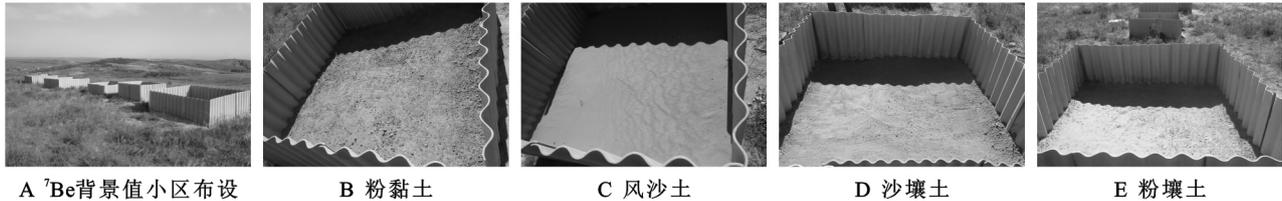


图1 不同类型土壤的⁷Be背景值小区

2.2 样品采集及处理

2.2.1 ⁷Be背景值样品的采集 在风季(2014年、2015年5月中旬)和雨季(2015年、2016年10月中旬)结束后,于各个背景值小区使用内径为14.7的环形采样器采集0—2.5 cm土壤全样和层样,并对每个背景值样区采集全样5个,层样以2.5 mm间距分10层采集一组。层样采集使用自行设计的上推分层采样器采集,分层采样器与Mabit等^[28]研究中使用的FISC采样器类似。

2.2.2 样品测定 所有样品经风干,去除杂草和砾石等后,一部分过1 mm筛,去除有机质和碳酸盐,随后使用英国Malven公司生产的MS-2000型激光粒度仪测定土壤颗粒粒度和比表面积;另取300 g左右的土样,过1 mm筛,装入与标准源相同规格的塑料盒中,在水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室利用美国ORTEC公司多道低本底 γ 能谱仪在477.6 keV状态下测定,每个样品的测定时间约为86 400 s,用全峰面积法(TPA)求算⁷Be的比活度。由于⁷Be没有标准源,测试之前,探头用已知活度的多放射标准源标定,包括:U-238, $\pm 2.2\%$; Th-232, $\pm 2.7\%$; Ra-226, $\pm 3.2\%$; Pb-210, $\pm 2.9\%$; K-40, $\pm 2.7\%$; Cs-137, $\pm 0.4\%$; 和 Co-60, $\pm 0.2\%$ 。每个⁷Be样品的含量都衰变校正到采样时的含量。

3 结果与分析

3.1 流域内4种典型土壤的颗粒组成

水蚀风蚀交错带的地表物质组成复杂,仅在六道沟流域土种就达到24种,其中主要包括黄绵土、红黄土、风沙土和淤土4个土类^[5],该4类土按照美国农业部的土壤分类标准(USDA, 1951)划分土壤类型,本流域的土壤主要分为粉壤土、粉黏土、沙壤土和风沙土4类(表1)。

表1 本研究土壤类型

土壤	平均 粒径/ Φ	分选 系数/ Φ	黏粒 含量/%	粉沙 含量/%	细沙 含量/%	中沙 含量/%	粗沙 含量/%
粉黏土	5.05	1.93	11.3	52.0	30.9	5.3	0.5
风沙土	1.91	1.07	0.4	2.7	44.6	31.5	21.1
沙壤土	4.31	1.30	4.9	42.1	53.0	0.0	0.0
粉壤土	3.50	43.5	16.6	65.9	16.4	0.9	0.1

3.2 ⁷Be背景值的确定

⁷Be背景值含量是估算土壤侵蚀量的基础,⁷Be背景值的准确性直接关系到示踪结果的准确性。由于分层采样过程及仪器测量过程存在误差^[29],因此本研究⁷Be背景值确定为实测背景值与⁷Be剖面函数得到的理论背景值的平均值,并将2015年和2016年两年得到的⁷Be背景值再平均作为最终确定的⁷Be背景值。表2为风季和雨季后各小区的⁷Be背景含量。粉黏土、风沙土、沙壤土和粉壤土风季⁷Be背景值分别为248.1, 237.5, 240.5, 244.7 Bq/m²,雨季⁷Be背景值分别为621.9, 611.4, 623.4, 618.4 Bq/m²。由表2可知,雨季的⁷Be含量占了全年70%以上,说明雨季⁷Be的沉降明显高于风季。

表2 各小区⁷Be背景值含量 Bq/m²

观测季节	年份	粉黏土	风沙土	沙壤土	粉壤土
风季	2015	237.4	231.4	224.9	237.0
	2016	258.7	243.6	256.1	252.4
	平均	248.1	237.5	240.5	244.7
雨季	2015	611.3	591.4	612.7	616.0
	2016	632.5	631.4	631.9	620.8
	平均	621.9	611.4	623.4	618.4

3.3 ⁷Be剖面分布特征

⁷Be在土壤表层的剖面分布特征是利用⁷Be示踪土壤侵蚀的关键。4种土壤于2015年风季(2015年10月—2016年5月)和2016年风季(2016年10月—2017年5月),2015年雨季(2015年6—9月)和2016年雨季(2016年6—9月)的⁷Be剖面分布图如

图 2—3 所示,各种土壤剖面中⁷Be 面积活度随土层深度的增大呈指数递减($R^2 \geq 0.92$),这与前人的研究结果相似^[30-31]。⁷Be 测定结果显示,⁷Be 主要分布在 0—10 mm 深度内,这种分布模式为示踪强度较弱的土壤侵蚀提供了方法。对观测的 4 种土壤,⁷Be 的土壤剖面分布在两年间均无显著差异。表层土壤中 (0—2.5 cm)⁷Be 的含量表明,雨季各种土壤中的⁷Be 含量均大于风季,因为⁷Be 主要以湿沉降的方式到达

地面,研究区的干湿季明显分异直接导致了⁷Be 沉降的季节变化。此外,4 种土壤表现出 2016 年风季和雨季的⁷Be 含量均大于 2015 年,造成这种差异的主要原因也与降雨/降雪相关。以雨季为例,小区附近的气象观测记录显示,2016 年降水量约为 602.20 mm,而 2015 年仅为 384.00 mm。对既没有侵蚀也没有沉积的背景值区域,降雨/降雪量较大的年份土壤会得到更多的⁷Be 输入^[14]。

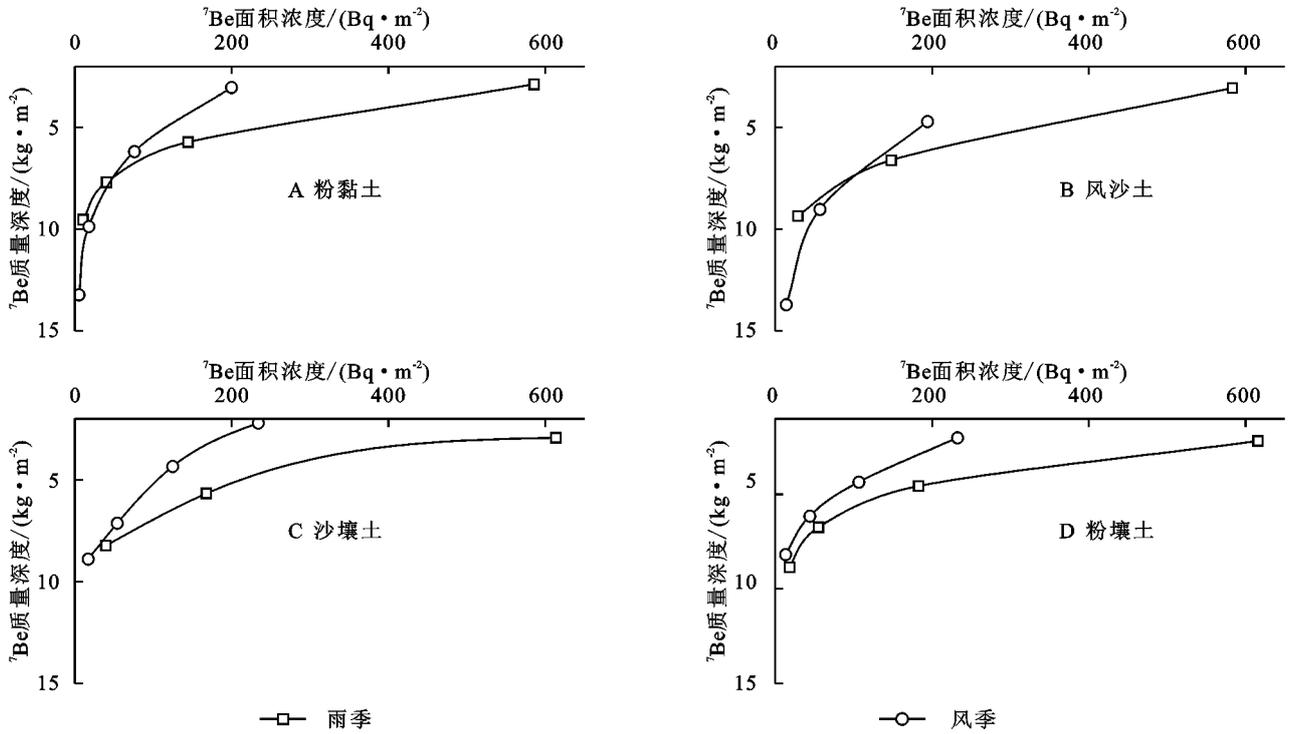


图 2 2015 年同种土壤风季雨季的⁷Be 背景值剖面分布

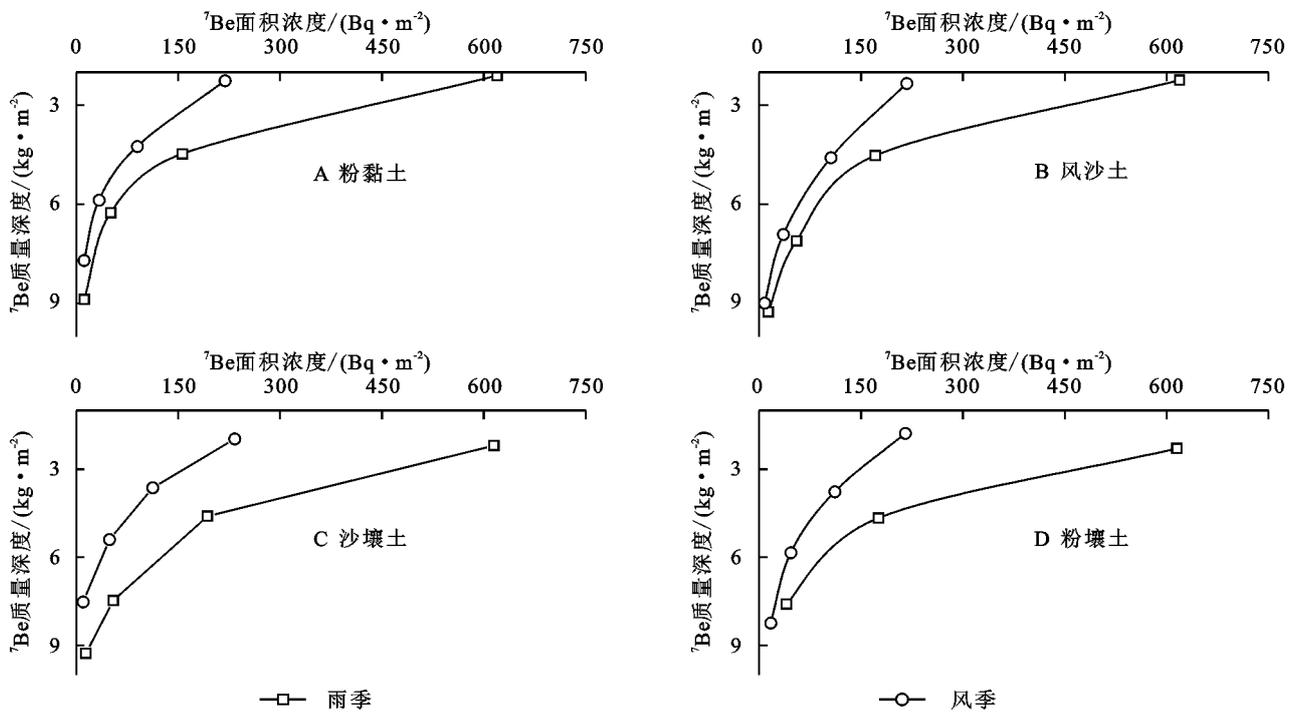


图 3 2016 年同种类型土壤风季雨季的⁷Be 背景值剖面分布

3.4 土壤张弛质量深度(h_0)的确定

土壤张弛质量深度(h_0)是描述⁷Be质量浓度和面积浓度在地表土壤剖面分布特征的重要参数,其表征⁷Be在土壤剖面的垂向分布变化及其最大深度。根据张风宝^[14]的研究发现,一般地从地表到 h_0 的深度范围内,⁷Be的面积活度占总面积活度的63%。基于Walling模型^[32],由⁷Be面积活度、质量活度与张弛质量活度之间的关系[公式(1)]可知,质量活度理论值的对数与 x 处测得的⁷Be初始活度线性相关,线关系式斜率的倒数即为张弛质量深度。

$$A_{\text{Be}}(x) = \int_x^{\infty} C_{\text{Be}}(x) dx = C_{\text{Be}}(0)h_0 = A_{\text{ref}}e^{-x/h_0} \quad (1)$$

式中: x 为质量深度(kg/m^2); $C_{\text{Be}}(x)$ 为 x 处的⁷Be初始活度(Bq/kg); $C_{\text{Be}}(0)$ 为地表(即 $x=0$)的⁷Be初始浓度(Bq/kg); h_0 为张弛质量深度(kg/m^2); $A_{\text{Be}}(x)$ 为深度 x 以下⁷Be的总活度; A_{ref} 为研究区土壤中⁷Be的基准值(背景值)。

土壤的张弛质量深度存在明显的季节差异和土壤类别差异。总体上,风季土壤的张弛质量深度大于雨季,土壤黏粒含量越高则张弛质量深度越小(表3)。对研究的4种土壤,张弛质量深度的变化均表明,同一土壤类型于风季的土壤张弛质量深度大于雨季,4种土壤在研究期间(2015年、2016年)风季平均张弛质量深度比雨季大0.32~0.50 kg/m^2 。这与Walling等^[33]的研究结果类似,对智利南部瓦尔迪维亚地区粉黏土的研究发现土壤风季的张弛质量深度(1.93 kg/m^2)高于雨季(1.60 kg/m^2)。对同一研究区域,在降雨量相同的条件下,土壤黏粒含量表现出风季和雨季均与张弛质量深度呈线性负相关,黏粒含量越高张弛质量深度越小,表明⁷Be往深层土壤中迁移的程度越小,较高浓度的⁷Be聚集在较浅表层土壤中,⁷Be表征土壤侵蚀的敏感性更高(图4)。可见,降水和土壤类型均对⁷Be有明显的影 响。由于风季的降水数据(尤其是降雪)难以获取,加之降尘对⁷Be在风季的输入有重要影响^[34];本研究以雨季为例,分析降雨和土壤类型对⁷Be背景值的影响。结果显示,张弛质量深度与降雨量(R , mm)或土壤黏粒含量(c , %)之间的关系可以用简单的线性关系表示。降雨量和土壤黏粒含量均与土壤张弛质量深度呈负相关关系,见公式(2)。

$$h_0 = 3.40 - 0.02c - 0.22 \ln R \quad R^2 = 0.75 \quad (2)$$

式中: h_0 为张弛质量深度(kg/m^2); R 为降雨量(mm); c 为土壤黏粒含量(%)。

表3 各土壤类型的土壤张弛质量深度

		kg/m^2			
观测季节	年份	粉黏土	风沙土	沙壤土	粉壤土
风季	2015	2.29	2.55	2.53	2.20
	2016	2.09	2.46	2.08	2.10
	平均	2.19	2.51	2.30	2.15
雨季	2015	1.86	2.15	2.06	1.85
	2016	1.85	1.87	1.90	1.78
	平均	1.86	2.01	1.98	1.82

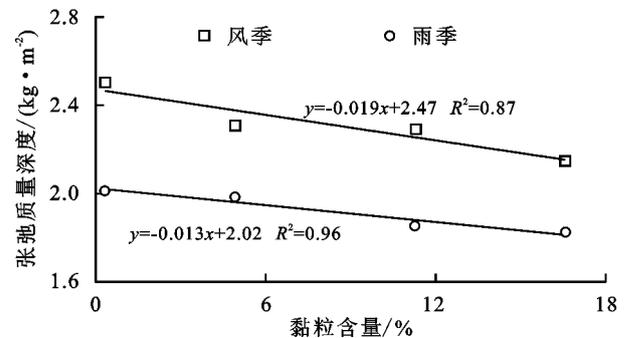


图4 不同类型土壤平均黏粒含量与张弛质量深度的关系

4 讨论

黄土高原水蚀风蚀交错带存在明显的干湿季节变化,水蚀主要发生在雨季(6—9月),风蚀主要发生在风季(10—5月)。前人运用⁷Be示踪技术分别研究了该区域粉黏土、粉壤土和沙壤土的风力侵蚀,描绘风蚀空间分布特征^[35-36],但仍未实现对土壤风水交错侵蚀的研究。⁷Be较短的半衰期和明显的季节分布特征为运用其开展风水交错侵蚀特征研究提供了可能,为定量区分风蚀和水蚀对总侵蚀的贡献奠定了基础。⁷Be的背景特征,尤其是其在土壤中的剖面分布特征是影响⁷Be示踪土壤侵蚀准确性的关键,而土壤张弛质量深度 h_0 是表征⁷Be在土壤表层垂直分布特征的关键参数,直接反映了⁷Be在土壤剖面的垂直分布特征和最大深度^[14]。本研究对黄土高原水蚀风蚀交错带4种典型土壤类型的分析发现,风沙土的 h_0 在风季和雨季均大于其他3种土壤,且其变异程度(变异系数为14%)也较其他3种土壤大。这与土壤的机械组成差异具有重要的相关性,于风沙土而言,其颗粒较粗,细组分(黏粒和粉沙)含量较低($<3.1\%$),而⁷Be主要选择性地吸附在细颗粒上,尤其与黏粒含量密切相关。风沙土的黏粒含量低,细颗粒少,对⁷Be的吸附较弱,风沙土大孔隙结构产生的优先流路径的存在也会影响⁷Be的垂直分布^[37-38]。加之,风沙土在水力侵蚀过程中往往表现出明显的重力侵蚀特征^[39]。在降雨过程中,风沙土的典型侵蚀发育过程为垂直渗流—潜流—

崩塌,泻溜为其典型的侵蚀方式^[40],土壤侵蚀速率较大,易超过⁷Be 的示踪能力(侵蚀厚度约 <2 cm),示踪结果的可靠性和准确性较差。因此,在水蚀风蚀交错带,⁷Be 示踪可用于粉黏土、粉壤土和沙壤土的交错侵蚀,而在风沙土适用性较差。

5 结论

本研究基于⁷Be 半衰期较短和试验区干湿季节分异明显的特征,以水蚀风蚀交错区的 4 种典型土壤为研究对象,分析了⁷Be 剖面分布特征和张弛质量深度 h_0 等关键参数的季节变化,研究了⁷Be 在水蚀风蚀交错带示踪土壤风蚀和水蚀的可行性和适用性。研究表明⁷Be 与土壤类型和降雨量的季节变化相关。雨季的⁷Be 含量均大于风季,降雨量大的年份土壤⁷Be 含量较高,黏粒含量较高的土壤⁷Be 含量较高。张弛质量深度 h_0 随土壤类型和季节变化表现出明显的改变。风季 h_0 的平均值大于雨季;土壤黏粒含量较低的土壤的张弛质量深度 h_0 较小(线性负相关)。研究结果表明,⁷Be 具有示踪水蚀风蚀交错带粉壤土、粉黏土和沙壤土风蚀和水蚀的潜能,而示踪风沙土侵蚀的适用性较差,主要归因于风沙土较大的侵蚀速率和⁷Be 在表层风沙土中的分布变异较大两方面原因。此外,本研究只是从⁷Be 背景值分布角度讨论了其示踪该区域风蚀和水蚀的可行性,具体的示踪适用性还需要在研究区域开展具有针对性的深入研究。

参考文献:

- [1] 赵景波,杜娟,黄春长.黄土高原侵蚀期研究[J].中国沙漠,2002,22(3):257-261.
- [2] 索安宁,赵文喆,王天明,等.近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征[J].北京林业大学学报,2007,29(1):90-97.
- [3] 唐克丽,侯庆春,王斌科,等.黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J].西北水土保持研究所集刊,1993,18(2):1-15.
- [4] 唐克丽.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域治理模式探讨[J].水土保持研究,1996,3(4):46-55.
- [5] 贾恒义,雍绍萍,王富乾.神木试区的土壤资源[J].西北水土保持研究所集刊,1993,18(2):36-46.
- [6] 唐克丽.中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J].水土保持研究,1999,6(2):12-19.
- [7] 孙喜军.黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀速率的⁷Be 和¹³⁷Cs 示踪研究[D].北京:中国科学院研究生院,2012.
- [8] 韩凤朋.黄土高原小流域土壤养分分布及 WEPP 模型模拟研究[D].北京:中国科学院研究生院,2009.
- [9] 张庆印,樊军,张晓萍.退耕还林(草)对农牧交错区小流域景观格局的影响:以神木县六道沟小流域为例[J].中国水土保持科学,2013,11(2):98-103.
- [10] 陈国建,张晓萍,张平仓,等.基于 RS 和 GIS 的六道沟流域土地利用动态变化研究[J].水土保持研究,2009,16(2):96-100.
- [11] 宋炜,刘普灵,杨明义.核素示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用进展[J].核农学报,2003,17(3):236-238.
- [12] Akata N, Kawabata H, Hasegawa H, et al. Total deposition velocities and scavenging ratios of ⁷Be and ²¹⁰Pb at Rokkasho, Japan[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008,277(2):347-355.
- [13] Yang M Y, Walling D E, Tian J L, et al. Partitioning the contributions of sheet and rill erosion using beryllium-7 and cesium-137[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1579-1590.
- [14] 张风宝.⁷Be 沉降在地表分配规律及在示踪坡面侵蚀过程中的应用研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [15] Wallbrink P J, Murray A S. Distribution and variability of ⁷Be in soils under different surface cover condition and its potential for describing soil redistribution[J]. Water Resources Research, 1996,32(2):467-476.
- [16] Lal D, Peters B. Cosmic ray produced radioactivity on the Earth[M]// Kosmische Strahlung II /Cosmic Rays II. Berlin: Springer, 1967.
- [17] Zhang F B, Zhang B, Yang M Y. Beryllium-7 atmospheric deposition and soil inventory on the northern Loess Plateau of China[J]. Atmospheric environment, 2013,77:178-184.
- [18] 张博,张风宝,杨明义.荒草地小区土壤侵蚀的⁷Be 示踪研究[J].核农学报,2013,27(1):93-98.
- [19] 张信宝,冯明义,张一云,等.川中丘陵区⁷Be 在土壤中的分布和季节性本底值[J].核技术,2004,27(11):873-876.
- [20] 白占国,万国江,王长生,等.黔中岩溶山区表土层中⁷Be 的分布特征及其侵蚀示踪研究[J].自然科学进展,1997,7(1):68-76.
- [21] 白占国,万国江.滇西和黔中表土中⁷Be 与¹³⁷Cs 分布特征对比研究[J].地理科学,2002,22(1):43-48.
- [22] 杨本俊.宁镇地区土壤侵蚀的⁷Be 示踪研究[D].南京:南京师范大学,2014.
- [23] 丁晋利,郑粉莉.⁷Be 在灰色黄土正常新成土土壤颗粒中的分布[J].安徽农业科学,2013,41(3):1088-1097.
- [24] 史忠林,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土⁷Be 剖面分布及季节变化[J].山地学报,2010,28(6):674-679.
- [25] Shi Z L, Wen A B, Yan D C, et al. Temporal variation of Be fallout and its inventory in purple soil in the

- Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Journal of Radioanalytical & Nuclear*, 2011,288(3):671-676.
- [26] Olsen C R, Larsen I L, Lowry P D, et al. Atmospheric fluxes and marsh-soil inventories of ⁷Be and ²¹⁰Pb[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(6):10487-10495.
- [27] 刘淼.黄土坡面细沟与细沟间侵蚀比率变化规律研究[D].北京:中国科学院研究生院,2015.
- [28] Mabit L, Meusburger K, Iurian A R, et al. Sampling soil and sediment depth profiles at a fine resolution with a new device for determining physical, chemical and biological properties: the Fine Increment Soil Collector (FISC) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014,14(3):630-636.
- [29] 史忠林,王安邦,严冬春,等.⁷Be法估算土壤侵蚀速率若干问题的探讨[J].*地球科学进展*,2016,31(9):885-893.
- [30] 张风宝,杨明义,王光谦.坡耕地小区坡面不同坡段侵蚀泥沙贡献率的⁷Be示踪研究[J].*泥沙研究*,2011(1):38-44.
- [31] 张风宝.⁷Be示踪土壤侵蚀关键基础性问题的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [32] Walling D E, He Q, Blake W. Use of ⁷Be and ¹³⁷Cs measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. *Water Resources Research*, 1999,35(12):3865-3874.
- [33] Walling D E, Schuller P, Zhang Y, et al. Extending the timescale for using beryllium 7 measurements to document soil redistribution by erosion[J]. *Water Resources Research*, 2009,45(2):325-336.
- [34] 张风宝,张博,杨明义.基于未扰动土壤中⁷Be的量估算其沉降通量的研究[J].*原子能科学技术*,2014,48(9):1698-1706.
- [35] Zhang J Q, Yang M Y, Deng X X, et al. Beryllium-7 measurements of wind erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,615:240-252.
- [36] Zhang J Q, Yang M Y, Deng X X, et al. The effects of tillage on sheet erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,187:235-245.
- [37] Ryken N, Al-Barri B, Taylor A, et al. Quantifying the spatial variation of ⁷Be depth distributions towards improved erosion rate estimations[J]. *Geoderma*, 2016, 269:10-18.
- [38] Bundt M, Albrecht A, Froidevaux P, et al. Impact of preferential flow on radionuclide distribution in soil[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000,34(18):3895-3899.
- [39] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2017,549:244-251.
- [40] 张丽萍,倪含斌,吴希媛.黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征试验研究[J].*水土保持研究*, 2005,12(5):162-192.