

黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀速率空间分布

刘章^①, 杨明义^{①②*}, 张加琮^{①②}

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, 杨凌 712100;

② 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

* 联系人, E-mail: ymyzly@163.com

2015-09-24 收稿, 2015-10-13 修回, 2015-10-15 接受, 2016-01-12 网络版发表

国家自然科学基金(41401314, 41171228)资助

摘要 受水蚀和风蚀的交错作用, 黄土高原水蚀风蚀交错带的土壤风蚀速率难以从总侵蚀中提取出, 更难以描绘其坡面分布特征. 本研究运用⁷Be示踪技术, 在神木县六道沟流域选择方向偏北的砂壤土和黏壤土坡耕地, 沿与坡面走向大致平行的方向布设采样线, 采集0~30 mm土壤样品, 估算土壤风蚀速率, 探究风蚀速率的坡面分布特征及其所指示的风况和微地貌特征. 结果表明: 经过风季后, 表层土壤颗粒变粗, 比表面积变小, 有机质含量降低, 这些土壤理化性质变化表明两坡面均发生风蚀. 砂壤土坡面A的平均风蚀速率为1560.81 t/(km² a), 黏壤土坡面B的平均风蚀速率为694.26 t/(km² a), 风蚀速率在两坡面均呈现从坡顶到坡脚逐渐减小的空间分布特征. 两坡面风蚀速率等值线分布不仅指示了土壤风蚀的坡面分布特征, 还揭示了造成该分布的有效合成风向为北风. 风蚀速率等值线的局部形状变异显示了坡面微地貌形态, 等值线的变异程度显现了微地貌对风蚀速率的影响程度和范围.

关键词 水蚀风蚀交错带, 风蚀速率, ⁷Be 示踪技术, 空间分布

土壤风蚀是塑造地球景观的基本地貌过程之一, 也是我国北方地区土地退化的重要原因^[1]. 在黄土高原水蚀风蚀交错带, 冬春两季气候干燥, 地表植被覆盖度低, 大风频繁, 是土壤风蚀的高发季节^[2,3]. 强烈的风蚀导致农田土壤表层颗粒变粗, 养分大量流失, 土地生产力降低甚至丧失, 对农业的可持续发展造成严重的威胁^[4]. 因此, 加强对土壤风蚀的研究意义重大. 在土壤侵蚀发生的基本地貌单元(坡面)尺度探明坡面土壤风蚀的空间分布规律^[5], 对坡耕地土壤风蚀的科学评价和制定有效的治理措施提供了重要依据. 然而, 受土壤水蚀、地形复杂和地面物质组成多样等因素的影响, 黄土高原水蚀风蚀交错带的土壤风蚀研究非常有限. 张丽萍等人^[6]在神木县通过野

外调查和资料分析发现迎风坡、丘顶和气流发生复合的沟谷段土壤风蚀较严重. 查轩和唐克丽^[7]发现六道沟流域土壤风蚀较强烈的崩坡部位为西北坡(迎风坡)、崩顶, 应重点加强土壤风蚀的防治. 可见, 目前对坡面土壤风蚀空间分布的研究主要集中在不同坡向坡面的风蚀差异方面, 尚未见关于单一坡面短期内土壤风蚀速率空间分布的研究报道.

本研究运用天然放射性核素⁷Be在示踪土壤风蚀有独特的优势, 尤其是短期内的土壤风蚀. ⁷Be半衰期仅为53.3 d^[8-10], 它通过干湿沉降到达地表后, 迅速被地表的土壤颗粒吸附^[11,12], 其主要分布在表层0~20 mm的土壤中, 含量随深度的增加呈指数递减^[13], 这种分布特征为示踪短期内的土壤风蚀提供

引用格式: 刘章, 杨明义, 张加琮. 黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀速率空间分布. 科学通报, 2016, 61: 511-517

Liu Z, Yang M Y, Zhang J Q. Spatial distribution pattern of soil-wind erosion on slope farmlands in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 511-517, doi: 10.1360/N972015-00686

了准确、便利的方法. 此外, 在黄土高原水蚀风蚀交错带, 降雨集中分布在6~9月, 占全年降雨量的76.3%(1957~2011年平均值)^[14], 10月之后降雨显著减少, 侵蚀性降雨稀少, 几乎无水蚀发生, 这种降雨特征既降低了风蚀期间湿沉降对地表土壤中⁷Be含量的影响, 也为⁷Be在表层土壤中垂直分布形式的恢复提供了充足的时间^[15], 为准确定量风蚀提供了可能. 然而, ⁷Be示踪风蚀也存在估算误差较大的可能性. 因为干旱期降水量有限, ⁷Be在土壤中含量可能较低, 测定误差增大, 从而导致其对风蚀指示不准确. 前人的研究验证了⁷Be在有限降水条件下的适用性, 为本研究的开展奠定了基础^[16,17]. 本研究通过测定水蚀风蚀交错带典型坡面的⁷Be含量, 利用⁷Be风蚀速率估算模型估算得到不同坡面的土壤风蚀速率及其空间分布特征, 拓展了水蚀风蚀交错带土壤风蚀规律的研究思路, 为黄土高原水蚀风蚀交错带坡面风水复合侵蚀的深入研究奠定基础.

1 研究方法

1.1 研究区概况

六道沟流域位于陕西省神木县以西14 km (38°46'~48°51'N, 110°21'~110°23'E)^[18], 流域面积6.89 km², 主沟道长4.21 km, 自南向北流入窟野河一级支流三道沟. 该区域地处毛乌素沙漠边缘, 是黄土高原水蚀风蚀交错带的典型区域, 自然条件的过渡性特征十分明显. 地貌类型为片沙覆盖的梁峁状黄土丘陵, 地形破碎, 风沙地貌和流水侵蚀地貌交错分布, 植被退化. 区域主要的土地利用类型有耕地、荒草地、灌木地、农果间作地和林地等^[18]. 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^[19], 大风日数年均13.5 d, 最长达44 d, 年均沙尘暴日数11.5 d, 最长达22 d. 当地年平均降水量为422.7 mm (1957~2011年), 年际和年内分布不均, 年内集中于6~9月. 本研究开展期间(2009年10月~2010年5月), 共计发生降雨18次, 降雨总量为94.8 mm, 平均次降雨量5.3 mm, 最大次降雨量为16.6 mm; 降雪7次, 降雪量为50.6 mm, 最大降雪量20 mm.

1.2 样品的采集及处理

(i) 坡面样品采集. 在六道沟流域选取两个位

于崩坡中下部、平直, 秋收后翻耕整平的农耕地坡面A和B. 坡面A为砂壤土, 坡向为北向, 坡度约为12°, 坡长约35 m, 坡面形态呈长方形; 坡面B为黏壤土, 坡向为西北向, 坡度约为23°, 坡长约70 m, 坡面形态呈扇形. 2009年10月(风季前), 沿两坡面布设样线, 使用直径为3 cm的环形采样器采集0~30 mm土壤样品. 在坡面A等间距、平行布设4条样线, 每条样线上以约5 m的间距采集土壤样品; 在坡面B呈扇形布设3条样线, 每条样线上以约10 m的间距采集土壤样品(图1). 2010年5月风季基本结束后采用同样的采样方法在原采样点再次采集0~30 mm的土壤样品. 测定风季前后所有样品的组分含量、比表面积和有机质含量, 此外还测定2010年5月样品的⁷Be含量.

(ii) ⁷Be背景值样品采集. 2009年10月中旬(风季前), 在两坡面附近的背风平坦地上选取4个1 m×1 m的小区, 作为⁷Be背景值采样区, 小区翻耕整平后, 用60 cm的石棉瓦围封以避免发生风蚀和人为干

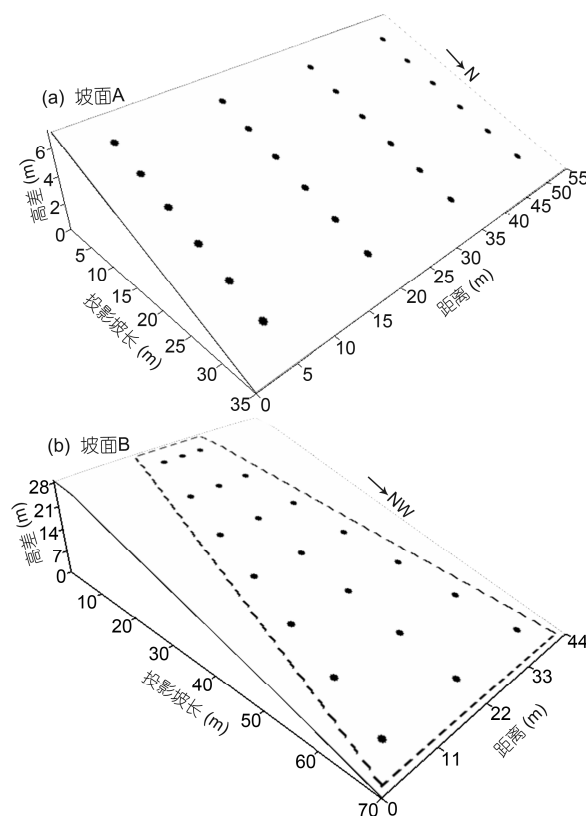


图1 砂壤土坡面A和黏壤土坡面B采样点布设图(箭头指向的方向为N和NW)

Figure 1 The layout of sampling sites on the sandy loam slope A and clay loam slope B(The arrows point to the direction of north and north-west)

扰。于2010年5月下旬风季结束后采集分层样和全样。全样使用内径为14.7 cm的环形采样器采集, 共计4个; 层样使用刷子采集9个, 其中0~21 mm以3 mm的间距分8层采集, 21~30 mm为一层。样品处理后, 测定 ^7Be 含量。

(iii) 样品测试分析。样品经风干, 去除杂草和砾石等预处理后, 一部分过1 mm筛, 去除有机质和碳酸盐, 测定(Mastersizer 2000, 马尔文公司, 英国)组分含量和比表面积; 另取300 g左右, 过1 mm筛, 装入与标准源相同规格的塑料盒中, 用多道低本底伽马能谱仪(ORTEC公司, 美国)在477.6 keV状态下测定 ^7Be 活度; 此外, 取0.5 g左右的样品, 过0.25 mm筛, 用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质。

(iv) 土壤风蚀速率计算。Yang等人^[16]基于Walling等人^[20]的水蚀模型, 借鉴Walling等的 ^{137}Cs 估算具有分选性的土壤侵蚀速率的模型, 提出了考虑颗粒分选作用的 ^7Be 风蚀速率估算模型, 该模型可以准确地估算土壤风蚀速率, 并在陕西省神木县六道沟流域进行了野外验证。 ^7Be 风蚀速率估算模型计算公式如下:

$$R_{\text{Be}, p'} = p' h_0 \ln \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{Be}}} \right) = \frac{1}{p'} h_0 \ln \left(\frac{A_{\text{ref}}}{A_{\text{Be}}} \right), \quad (1)$$

$$\text{其中,} \quad p' = \left(\frac{S_e}{S_0} \right)^v, \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{p'} \quad (3)$$

式中, $R_{\text{Be}, p'}$ 为土壤风蚀速率(kg/m^2), p' 为颗粒校正系数, S_e 为风蚀后表层土壤颗粒比表面积(m^2/g), S_0 为原始土壤颗粒比表面积(m^2/g), v 为常数(其值为0.75), h_0 为张弛质量深度(kg/m^2), A_{ref} 为 ^7Be 的背景值(Bq/m^2), A_{Be} 为采样点 ^7Be 的总活度(Bq/m^2)。

1.3 ^7Be 背景值及其剖面分布

^7Be 的土壤剖面分布测定是制约 ^7Be 示踪土壤侵蚀准确性的关键。图2为砂壤土背景值小区 ^7Be 的土壤剖面分布特征, ^7Be 含量随采样深度的增加呈指数减少, 表层含量最大, 砂壤土和黏壤土的值分别为49.67和29.58 Bq/kg 。本次研究砂壤土和黏壤土 ^7Be 背景值分别为320.65和305.18 Bq/m^2 。张弛质量深度 h_0 是根据 ^7Be 累积面积浓度的自然对数 $\text{Ln}(A_{\text{Be}}(x))$ 与累积土壤质量深度 x 拟合的线性回归方程(图3), 设土壤

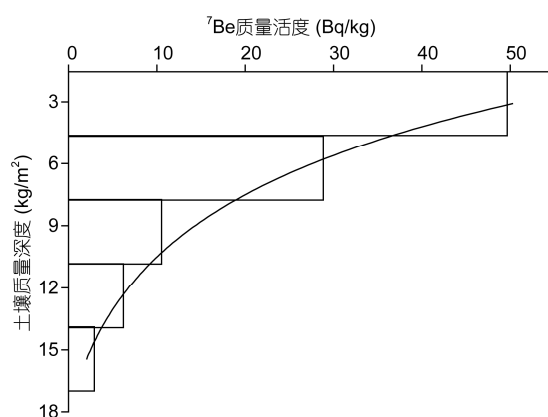


图2 背景值小区 ^7Be 的剖面分布特征(以砂壤土为例)

Figure 2 The depth distribution of ^7Be in the reference site of sandy loam

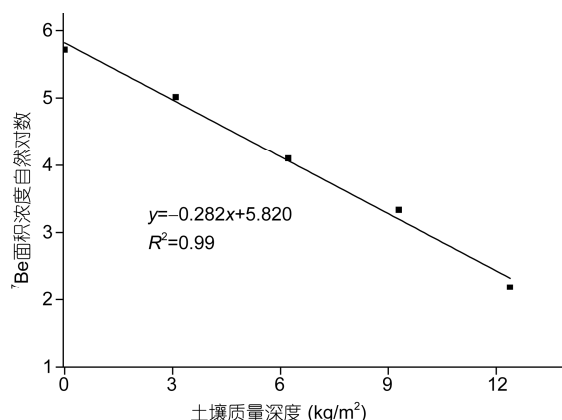


图3 ^7Be 累积面积浓度的对数与累积土壤质量深度的线性回归(以砂壤土为例)

Figure 3 The linear regression between the natural logarithm of ^7Be areal activity and accumulated soil mass depth of sandy loam

质量深度 $x=0$, 计算得到 ^7Be 面积浓度的对数值, 并反推得到 ^7Be 地表面积浓度 $A_{\text{Be}}(0)$, 再结合Walling等人^[20]模型和回归方程计算得到 h_0 , 本次研究计算得到的砂壤土和黏壤土的 h_0 分别为3.54和2.70 kg/m^2 。

2 结果与分析

2.1 坡面风蚀速率及其空间分布特征

无论是砂壤土坡面还是黏壤土坡面, 经过2009年9月~2010年5月期间的风季后, 两坡面的土壤中砂粒含量增加, 粉粒和黏粒含量不同程度地减少, 土壤颗粒的比表面积变小, 有机质含量降低, 表明研究期内研究坡面发生明显的土壤风蚀(表1)。

表1 风蚀前后各坡面表层(0~30 mm)土壤理化性状的变化^{a)}

Table 1 Changes of soil properties in surface layer (0~30 mm) for experimental slopes caused by wind erosion

坡面	采样时间	平均组分含量(%)			平均土壤颗粒比表面积(m ² /g)	平均有机质含量(%)
		砂粒 0.05~1.00 mm	粉粒 0.002~0.05 mm	黏粒 <0.002 mm		
A	2009-10	60.64	34.58	4.78	6.45×10 ⁻⁵	0.33
	2010-05	66.48	29.60	3.92	2.71×10 ⁻⁵	0.20
	Δ	5.84	-4.98	-0.86	-3.74×10 ⁻⁵	-0.13
B	2009-10	35.30	48.35	16.35	12.56×10 ⁻⁵	1.04
	2010-05	43.52	46.27	10.21	7.90×10 ⁻⁵	0.83
	Δ	8.22	-2.08	-6.14	-4.66×10 ⁻⁵	-0.21

a) Δ为2010年5月与2009年10月样品理化性质的差异

坡面土壤性质的改变只能对土壤风蚀进行定性判断, ⁷Be含量的分布是定量分析坡面风蚀速率的依据. 在两坡面, ⁷Be含量均呈现坡面下部较高, 上部较低的分布特征. 然而, ⁷Be含量等值线在两坡面的形态存在差异, 且数值差别较大. 砂壤土坡面A等值线空间分布比较均匀, 与坡面走向基本垂直; ⁷Be含量平均为137.53 Bq/m², 变异系数为13.00%. 黏壤土坡面B等值线空间分布差异大, 等值线在坡面上部与坡面走向基本垂直, 在坡面下部有显著的形变; ⁷Be含量平均为212.58 Bq/m², 变异系数为19.27%(图4).

坡面A和B总体上呈现出⁷Be含量由坡面下部向上逐渐减小的趋势. ⁷Be等值线在坡面A和坡面B上部分布较平直, 在坡面B下部发生变形, 中部出现低值闭合中心(图4), 对翻耕后的平整耕地, 在无侵蚀发生的条件下, 坡面各部位⁷Be含量应该类似, 且⁷Be含量接近背景值. 风力侵蚀发生后, ⁷Be随被侵蚀的土壤颗粒损失含量降低. 对N坡和NW坡, 风速由坡面下部向上逐渐增大, 土壤风蚀由坡面下部向上逐渐加剧, 损失的表层土壤由下而上逐渐增多直接导致⁷Be含量逐渐降低. 对坡面B中部出现闭合中心, 坡下方向一定范围内的等值线发生朝向坡下方向的弯曲. 在等值线弯曲的位置, ⁷Be含量较等值线为平直状态下减小, 表明闭合中心为凸起地形, 上凸地形及其上风向一定范围内风速增强, 侵蚀增大, ⁷Be含量减小. 可见, 风速的坡面分布和微地貌是造成⁷Be等值线的坡面分布变异的主要原因.

依据⁷Be的坡面分布, 风蚀速率估算模型的计算结果显示, 砂壤土坡面A风蚀速率较黏壤土坡面B大, 但坡面A风蚀速率的空间变异性较B小. 砂壤土坡面A的风蚀速率值介于1400.19~1849.79 t/(km² a), 平均

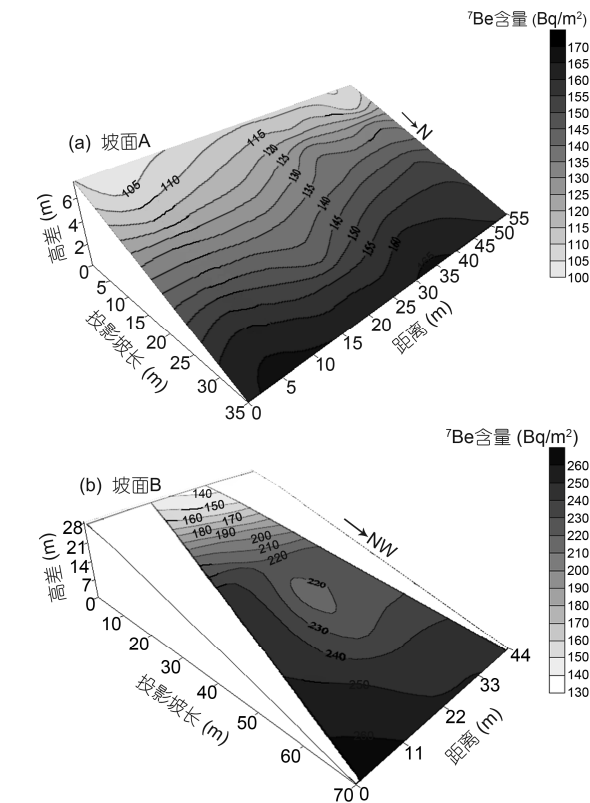


图4 砂壤土坡面A和黏壤土坡面B的⁷Be含量等值线图

Figure 4 The isolines of ⁷Be inventory on the sandy loam slope A and clay loam slope B

值为1560.81 t/(km² a), 变异系数为8.14%, 平均每年被风吹蚀的表土层厚度约为1.17 mm; 黏壤土坡面B的风蚀速率值介于336.30~1180.55 t/(km² a), 平均值为694.26 t/(km² a), 变异系数为36.97%, 平均每年被风吹蚀的表土层厚度约为0.56 mm. 结果与董治宝^[21]根据风蚀流失量经验估算模型在该研究区估算的平均风蚀速率(1887.27 t/(km² a))接近, 较张平仑^[22]基

于实测数据在该区域估算的平均风蚀速率($3199.86 \text{ t/(km}^2 \text{ a)}$)小. 该结果表明运用 ^7Be 示踪土壤风蚀的方法在研究区域可行.

风蚀速率在两坡面的空间分布特征具有相似性, 风蚀速率沿采样线的变化及其等值线均表明了从坡脚到坡顶逐渐增大的变化特征. 由于崩坡下部风蚀速率应较其中部小, 坡度较大时风蚀速率更大^[23], 两坡面的坡度、位置和风蚀速率差异, 表明砂壤土的可蚀性远大于黏壤土.

2.2 风蚀速率等值线空间分布的意义

坡面A和B上部风蚀速率等值线均较平直, 坡面A等值线方向与坡面走向基本垂直, 坡面B等值线方向与坡面斜交, 方向大致与北方垂直, 即对两坡面风蚀速率等值线方向均为东-西. 坡面A和B下部风蚀速率等值线均发生形变, 出现等值线闭合的高或低侵蚀中心(图5). 造成坡面上下部风蚀速率等值线形状差异巨大的主要原因是坡面上风向分布. 坡面下部的近地表风向更易受上风向障碍物的影响, 导致近地表风向的改变, 直接影响风蚀速率的分布, 坡面上部近地表风向受上风向障碍物影响较小, 当地的主风向是坡面风蚀速率分布的主导因素. 因而, 坡面上部的风蚀速率等值线更能反映造成坡面土壤风蚀分布规律的有效合成风向. 本研究中的两个坡面上部风蚀速率等值线走向均为东-西方向, 表明北风是造成迎风坡面土壤风蚀的主导风向.

坡面A下部等值线之间间距大, 线条上凸, 表明该区域风蚀速率较坡长类似的其他区域小, 坡面上风向障碍物(如树, 上凸地形)的遮挡造成近地表风速降低是主要原因. 微地貌的变化是两坡面出现等值线闭合的高或低侵蚀中心的主要原因. 坡面A的低侵蚀中心表明该处为略下凹的洼地, 其为直径约10 m的类圆区域. 坡面B的高侵蚀中心显示该处有小土丘分布, 该闭合中心上风向等值线的弯曲形状和方向表明, 该上凸小土丘导致气流在其上风向一定范围内气流加速^[24], 侵蚀加剧. 其影响范围约为其上风向10 m范围内. 可见, 风蚀速率等值线的分布不仅指示了土壤风蚀的坡面分布特征, 揭示了土壤风蚀的有效合成风向, 其局部形状变异还展现了坡面微地貌的变化.

虽然 ^7Be 含量等值线实质是对风蚀速率的体现, 坡面风况和微地貌变化是造成 ^7Be 含量和风蚀速率等

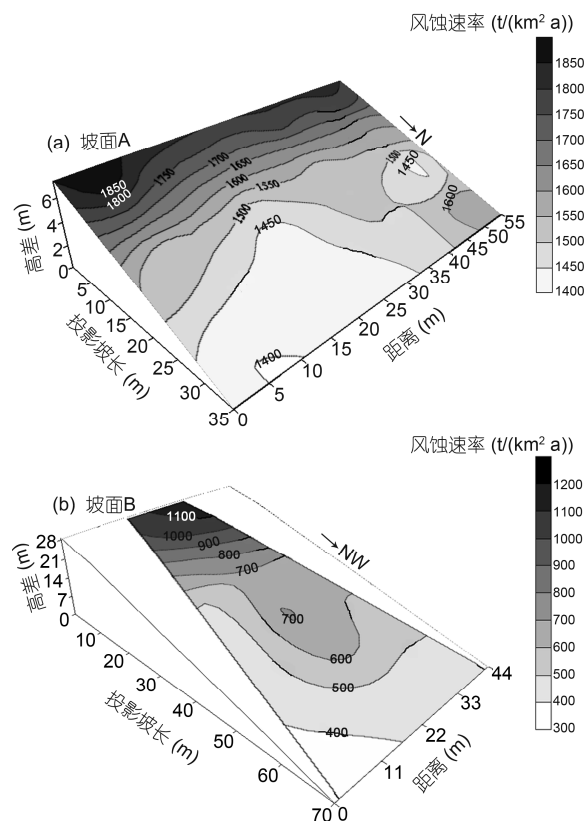


图5 砂壤土坡面A和黏壤土坡面B风蚀速率等值线图

Figure 5 The isolines of wind erosion rate on the sandy loam slope A and clay loam slope B

值线空间分布变异的主要原因. 然而, ^7Be 含量等值线的坡面分布与风蚀速率等值线分布并不完全一致. 主要原因是风蚀具有强烈的颗粒分选效应, 粒径在0.08~0.25 mm之间的土壤颗粒最易遭受风蚀^[25]. 可见, 在 ^7Be 风蚀速率估算模型中考虑风力分选效应非常必要.

3 结论

选取六道沟流域的两个典型坡耕地, 利用 ^7Be 风蚀速率估算模型确定了坡面风蚀速率并分析了风蚀速率的空间分布特征. 结果如下所示.

(1) 砂壤土坡面A的 ^7Be 含量为 137.53 Bq/m^2 , 黏壤土坡面B的为 212.58 Bq/m^2 ; 坡面下部 ^7Be 含量较高, 坡面上部较低.

(2) 砂壤土坡面A的平均风蚀速率为 $1560.81 \text{ t/(km}^2 \text{ a)}$, 平均每年被风吹蚀的表土层厚度约为1.17 mm, 黏壤土坡面B的平均风蚀速率为 $694.26 \text{ t/(km}^2 \text{ a)}$, 平均每年被风吹蚀的表土层厚度约为0.56 mm. 风蚀速率在两坡面

均呈现从坡脚到坡顶逐渐增大的变化规律。

(3) 风蚀速率等值线图可用于判定研究区的有效合成风向, 微地貌变化和上风向障碍物情况。两坡面上部风蚀速率等值线分布特征表明造成迎风坡面

土壤风蚀分布的有效合成风为北风。砂壤土坡面A上风向存在挡风的障碍物, 坡面中部有一直径约10 m 的类圆形洼地分布。黏壤土坡面B中部有小土丘分布, 影响了其上风向约10 m的风蚀分布。

参考文献

- Chen W N, Dong G R, Dong Z B. Achievements and needs of studies on wind erosion in northern China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1994, 9: 6–11 [陈渭南, 董光荣, 董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势. *地球科学进展*, 1994, 9: 6–11]
- Li Q Y, Cai Q G, Fang H Y. Contribution characteristics of wind erosion to the sediment yield in the Kuyehe River watershed at time scales (in Chinese). *J Nat Resour*, 2011, 26: 674–682 [李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 风蚀对窟野河流域产沙贡献的时间尺度特征. *自然资源学报*, 2011, 26: 674–682]
- Tang K L. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau (in Chinese). *Soil Water Conserv China*, 2000, 11: 11–12, 17 [唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性. *中国水土保持*, 2000, 11: 11–12, 17]
- Zhang H, Li F R, Zhang T H, et al. Field observations of wind erosion sediment in bare sandy farmland during erosion-prone spring (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2002, 16: 29–32, 79 [张华, 李峰瑞, 张铜会, 等. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征. *水土保持学报*, 2002, 16: 29–32, 79]
- Yang M Y, Tian J L. Research progress in erosion process on hillslope quantitatively (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2000, 15: 649–653 [杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展. *地球科学进展*, 2000, 15: 649–653]
- Zhang L P, Tang K L, Zhang P C. Research on soil wind erosion laws in loess hilly-gully region covered by sheet sand (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 1997, 3: 8–12 [张丽萍, 唐克丽, 张平仓. 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤风蚀特征研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3: 8–12]
- Cha X, Tang K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone (in Chinese). *J Nat Resour*, 2000, 15: 97–100 [查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究. *自然资源学报*, 2000, 15: 97–100]
- Azahra M, Camacho-Garcia A. Seasonal ^7Be concentrations in near-surface air of Granada in the period 1993–2001. *Appl Radiat Isot*, 2003, 59: 159–164
- Zhu H L, Tang J, Zhang X D. Applications of natural isotopes of ^7Be and ^{210}Pb in atmospheric science (in Chinese). *Meteor Sci Technol*, 2003, 31: 131–135 [朱厚玲, 汤洁, 郑向东. 天然放射性核素铍-7 和铅-210 在大气示踪研究中的应用. *气象科技*, 2003, 31: 131–135]
- Blake W H, Walling D E, He Q. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations (in Chinese). *Appl Radiat Isot*, 1999, 51: 599–605
- Zhang F B, Yang M Y, Liu P L, et al. A review on the behavior of ^7Be in ecosystem (in Chinese). *Acta Agric Nucl Sin*, 2006, 20: 444–448 [张风宝, 杨明义, 刘普灵, 等. ^7Be 在生态系统中的行为研究进展. *核农学报*, 2006, 20: 444–448]
- Akata N, Kawabata H, Hasegawa H, et al. Total deposition velocities and scavenging ratios of ^7Be and ^{210}Pb at Rokkasho, Japan. *J Radioanal Nucl Chem*, 2008, 277: 347–355
- 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. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 1579–1590
- Wu S Y. The analysis of variation of weather of Shenmu county in the past 55 years (in Chinese). *Clim Shanxi*, 2013, 2: 20–22 [吴胜勇. 神木县近 55 年气候特征及变化分析. *陕西气象*, 2013, 2: 20–22]
- Zhang F, Zhang B, Yang M. Beryllium-7 atmospheric deposition and soil inventory on the northern Loess Plateau of China. *Atmos Environ*, 2013, 77: 178–184
- Yang M Y, Walling D E, Sun X J, et al. A wind tunnel experiment to explore the feasibility of using beryllium-7 measurements to estimate soil loss by wind erosion. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 114: 81–93
- Li Y, Yu H Q, Chappell A, et al. How much soil organic carbon sequestration is due to conservation agriculture reducing soil erosion? *Soil Res*, 2014, 52: 717–726
- Liu C L, Shao M A. Soil hydraulic properties and their influences on soil water content under different land uses in Liudaogou watershed of Loess Plateau (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19: 2400–2407 [刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响. *应用生态学报*, 2008, 19: 2400–2407]

- 19 Li M, Li Z B, Liu P L, et al. Characteristics of different aspect of soil erosion in wind-water erosion crisscross region on Loess Plateau (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2004, 18: 63–65, 99 [李勉, 李占斌, 刘普灵, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征. *水土保持学报*, 2004, 18: 63–65, 99]
- 20 Walling D E, He Q P, Blake W. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resour Res*, 1999, 35: 3865–3874
- 21 Dong Z B. Establishing statistic model of wind erosion on small watershed basis (in Chinese). *Bull Soil Water Conserv*, 1998, 18: 55–62 [董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探. *水土保持通报*, 1998, 18: 55–62]
- 22 Zhang P C. Spatial and temporal variability of erosion by water and wind in wind-water erosion crisscross region—Taking Liudaogou watershed in Jin-Shaan-Meng contiguous areas as an example (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 1999, 5: 93–94 [张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究—以神木六道沟小流域为例. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5: 93–94]
- 23 Hong S W, Lee I B, Seo I H, et al. Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind erosion tunnel. *Biosyst Eng*, 2014, 118: 68–82
- 24 Li J G, Qu J J, Li F, et al. Wind tunnel simulation on flow fields around different types of sand dikes (in Chinese). *J Desert Res*, 2012, 32: 291–299 [李建国, 屈建军, 李芳, 等. 不同类型防沙堤流场的风洞实验模拟研究. *中国沙漠*, 2012, 32: 291–299]
- 25 Shi P J, Yan P, Yuan Y. Soil wind erosion research present situation and prospect in China (in Chinese). In: *The 12th International Conference on Water and Soil Conservation Invite Academic Report*. 2002 [史培军, 严平, 袁艺. 中国土壤风蚀研究的现状与展望. 见: 第十二届国际水土保持大会邀请学术报告. 2002]

Spatial distribution pattern of soil-wind erosion on slope farmlands in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau, China

LIU Zhang¹, YANG MingYi^{1,2} & ZHANG JiaQiong^{1,2}

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 712100, China;

² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry, Yangling 712100, China

Wind erosion is difficult to separate from the total erosion in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau, regardless of its spatial distribution. Water erosion also contributes to the total erosion. Water and wind erosions affect each other. The methods and techniques used in current research present the most significant limitation. Therefore, the methods and techniques of the field must be improved. A short-lived radionuclide— ^7Be —was used to trace wind erosion in this study. Surface soil samples (0–30 mm) were collected from two north-faced farmland slopes with sandy loam and clay loam using the transect approach in the Liudaogou Watershed. This study estimated the rates of soil-wind erosion, analyzed the spatial distribution pattern of soil-wind erosion, and discussed its implication to wind conditions and local microreliefs. Results showed that the average rate of wind erosion was 1560.81 t/(km² a) on sandy loam slope A and 694.26 t/(km² a) on clay loam slope B. The wind erosion rate decreased from top to bottom for both slopes. Soil particles were coarser, specific surface areas were smaller, and organic matter contents were lower in the surface layer (0–30 mm) after wind erosion than those before wind erosion. The isolines of the wind erosion rate visually showed the wind erosion distribution and indicated that the north wind was the effective resultant wind direction that caused soil loss. The variation in the shape of the isolines reflected the microreliefs of the slopes, and their variation degree denoted the influence degree and scope of microreliefs on wind erosion.

wind-water erosion crisscross region, wind erosion rate, ^7Be measurements, spatial distribution pattern

doi: 10.1360/N972015-00686