

黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤 侵蚀特征及其影响因素

张加琼^{1,2}, 刘章³, 杨明义^{1,2}, 张风宝^{1,2}, 王永吉^{1,2}, 邓鑫欣^{1,2}

(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; 3. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘要:水蚀与风蚀的交错作用大大加剧了黄土高原水蚀风蚀交错带的土壤侵蚀强度,造就了复杂的侵蚀环境。通过在水蚀风蚀交错带的典型区域——神木六道沟流域,选择沿本地盛行风向(NW)到最弱风向(E)方向的坡面布设采样断面,探究土壤粒径和土壤侵蚀速率的空间分布特征,分析其影响因素。结果表明:土壤粒径和侵蚀速率均表现出明显的波动变化和显著的坡面变异($p < 0.05$)。其坡面分异受坡面部位、坡度、植被、土壤类型、土地利用类型和侵蚀动力(风力和降雨)的共同影响。侵蚀动力之外的因素对土壤侵蚀速率的坡面变异累积解释 69.6%~82.1%。土壤侵蚀速率与坡面部位、坡度、植被、土壤类型和土地利用类型的线性回归分析显示,土壤侵蚀的动力因素也十分重要。然而,要揭示坡面土壤侵蚀空间分布的一般规律,定量区分水蚀和风蚀对坡面侵蚀的贡献,需进一步研究。

关键词:土壤侵蚀; 坡面变异; ¹³⁷Cs 示踪; 水蚀风蚀交错带; 粒径分布

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0001-06

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.001

Soil Erosion and Its Influence Factors on a Slope in the Wind-Water Erosion Crisscross Region on the Loess Plateau

ZHANG Jiaqiong^{1,2}, LIU Zhang³, YANG Mingyi^{1,2},
ZHANG Fengbao^{1,2}, WANG Yongji^{1,2}, DENG Xinxin^{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, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Rare Earth Research Institute of Baotou, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

Abstract: The alternating effect of wind and water erosion intensified soil loss in the wind-water erosion crisscross region, and formed a complicated erosion environment on the Loess Plateau. This study selected a hill going from northwest to east in the Liudaogou watershed of Shenmu County as the site to collect soil samples used for measuring ¹³⁷Cs and grain size. The distribution of soil grain size, erosion rate and the influence factors were studied. The results showed that grain-size and soil erosion had significant variations ($p < 0.05$) on two slopes with obvious undulation. The change of soil erosion was affected by conditions of underlying surface including slope position, gradient, vegetation, soils and land use type besides erosion forces (wind and rainfall). The results of principal component analysis showed that there were two components including all underlying surface factors. They explained that the variations of soil erosion ranged from 69.6% to 82.1%. The linear regression between soil erosion rate and these four factors (slope position, gradient, vegetation, soil and land use types) implied the importance of erosion forces besides underlying surface conditions. Unfortunately, spatial distribution of soil erosion on a single slope is unlikely to represent the general erosion pattern in this region, the ¹³⁷Cs tracing technique and grain-size analysis were far away from quantita-

收稿日期: 2016-12-08

修回日期: 2017-02-24

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41401314, 41371283); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04-03); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JQ4115); 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部博士项目

第一作者: 张加琼(1984—), 女(藏族), 四川小金人, 博士, 助理研究员, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: jqzhang@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 杨明义(1970—), 男, 山东莱州人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀核示踪技术研究。E-mail: ymyzly@163.com

tively dividing the contribution of wind erosion and water erosion in the total erosion on the slope scale. Further study with better methods and techniques is necessary.

Keywords: soil erosion; slope variation; ^{137}Cs tracing; wind-water erosion crisscross region; grain-size distribution

黄土高原水蚀风蚀交错带受风蚀和水蚀的交错作用,土壤侵蚀潜能高于风蚀为主的干旱区和水蚀为主的湿润区^[1-2]。水蚀和风蚀相互增加侵蚀的物质来源,相互促进,导致风水复合侵蚀的危害比单纯的风蚀或水蚀更严重,使得水蚀风蚀交错带成为黄土高原土壤侵蚀最强烈的地区,也是黄河下游河床泥沙的重要来源地。该区地形复杂,地面物质组成多样,生态环境脆弱^[3,5],土壤侵蚀过程和机制比水蚀为主和风蚀为主的区域更加复杂^[6-8],土壤侵蚀研究面临严峻挑战,治理工作难度巨大。加强该区域的土壤侵蚀研究,对制定科学的水土流失治理措施,改善生态环境,确保经济发展的可持续性具有重大意义,也有益于黄河泥沙治理。

核示踪技术于 20 世纪 60 年代初开始被引入到土壤侵蚀研究领域后, ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be , ^{226}Ra 等广泛应用,其中应用较成熟的是 ^{137}Cs ^[11-12]。 ^{137}Cs 示踪技术首先引入土壤水蚀研究,并逐渐应用到土壤风蚀研究,目前在土壤水蚀和风蚀研究中均得到广泛应用,但在土壤风水复合侵蚀研究中应用较少^[11-14]。其通过对比分析无侵蚀或沉积发生的背景值区域和采样区域的 ^{137}Cs 含量差异,选用适宜的模型估算土壤侵蚀速率^[10-12]。该方法避免了对复杂土壤侵蚀过程、地面物质组成和多种侵蚀营力的分析,快捷便利地得到土壤侵蚀结果,对研究复杂条件下的土壤侵蚀具有独到的优势。粒度作为土壤的基本属性,是分析土壤颗粒的搬运、沉积过程和机制,判别侵蚀动力条件的重要方法^[16-17]。此外,土壤的机械组成对上述研究也十分重要。因此,粒度分布广泛应用于海相、河湖相、海陆过渡相和陆相沉积研究中,为恢复古气候,判别沉积环境,回溯沉积过程,分析沉积动力提供了简便、有效的手段^[19-22]。然而,受限于水蚀风蚀交错带土壤侵蚀方式和过程的多样和复杂,尚无运用土壤的粒度分布特征研究坡面侵蚀环境的研究。

在土壤侵蚀发生的基本地貌单元(坡面)尺度弄清坡面土壤侵蚀和粒度的空间分布特征,对探究坡面的侵蚀环境意义重大。本研究在陕西省神木县六道沟流域选取代表性坡面,运用 ^{137}Cs 示踪技术估算土壤侵蚀速率,结合土壤粒度分布特征,探究坡面土壤侵蚀分布特征及其影响因素,讨论水力和风力对坡面侵蚀的影响,对区分黄土高原水蚀风蚀交错带的水蚀和风蚀具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

六道沟流域为黄土高原水蚀风蚀交错带典型区域,位于陕西省神木县以西 14 km,流域面积 6.89 km²,主沟道长 4.21 km,自南而北流入窟野河一级支流。该区域北依长城,地处毛乌素沙漠边缘,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。年际、年内气候变化剧烈,旱洪及沙尘暴灾害频繁。降水年际变化大且年内集中,年均降水 408.5 mm,年际变化剧烈,最大降水量 819.1 mm,最小 106.8 mm,其中 6—9 月降水量占全年的 80.9%,而且多为大暴雨。当地主风向为西北,次主风向为东南,东风最弱,年均风速 3.6 m/s,大风日数 13.5 d,最多达 44 d,年均沙尘暴日数 11.5 d,最多达 22 d。

1.2 样品采集和分析

选取走向为从本地盛行风向(NW)到最弱风向(E)方向的坡面,从 NW 坡脚到 E 坡中下部(坡下部为深沟)布设样线,使用土钻法采集土壤样品,分别用于测定 ^{137}Cs 活度和土壤粒度(图 1)。 ^{137}Cs 活度样品采集深度为 0—30 cm;粒度样品在每个采样点分三层采集(0—5 cm,5—10 cm 和 10—15 cm),同时在每个采样点使用环刀法采集表层土壤容重样品。沿样线共选取 33 个样点,其中 19 个分布于 NW 坡,14 个分布于 E 坡。采样的同时,在各个采样点测定坡面坡度(坡度仪),调查植被种类、盖度(样方法),记录土壤类型和土地利用类型等。土壤样品经预处理后使用伽马能谱仪(ORTEC 公司,美国)在 661.6 keV 测定 ^{137}Cs 活度,使用 Mastersizer 2 000(马尔文公司,英国)测定粒度。样品测试于 2015 年 1 月在中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室完成,粒度参数采用 Folk-Word 图解法公式计算,颗粒分级采用 Udden-Wentworth 分级标准,即: $>8\Phi$ 黏粒、 $4\sim 8\Phi$ 为粉粒、 $2\sim 4\Phi$ 为细沙、 $1\sim 2\Phi$ 为中沙、 $-1\sim 1\Phi$ 为粗沙、 $<-1\Phi$ 为砾石。

1.3 土壤侵蚀估算

采样坡面包括耕地、退耕地和沙地。退耕地于 2000 年后陆续退耕,耕作期间连年翻耕,其翻耕年数远大于未翻耕年数(退耕后),且退耕后恢复为草地或

种植柠条、沙柳,土壤侵蚀速率明显减小。沙地在采样深度(0~15 cm)内颗粒粒度分布均匀(见 3.1),与耕地的耕作层类似。因此,所有采样点均使用以下质量平衡模型估算土壤侵蚀速率:

$$E=10^4 Bh \quad (1)$$

$$X=X_0(1-\frac{h}{H})^{N-1963} \quad (2)$$

式中: E 为土壤风蚀模数[$t/(km^2 \cdot a)$]; B 为实测土壤密度(g/cm^3); h 为年均侵蚀厚度(cm/a); X 为实际测得的侵蚀土壤剖面 ^{137}Cs 含量(Bq/m^2); X_0 为 ^{137}Cs 背景值(Bq/m^2); H 为耕作层厚度(cm),在研究区取值 20 cm ; N 为样品采样和测试年份(2014 年)。孙喜军 2009 年在本研究坡面附近选择位于一百年古庙旁无侵蚀和沉积发生的草地,采用土钻采集 0 表示 30 cm 沙黄土样品(11 个),结果显示 ^{137}Cs 背景值为 1 290 Bq/m^2 ,依据以下方法将 ^{137}Cs 衰变校正到 2014 年,本区域沙黄土的 ^{137}Cs 背景值为 1 150 Bq/m^2 。

$$X_N=X_n(\frac{1}{2})^{\frac{N-n}{T}} \quad (3)$$

式中: X_N 为校正到第 N 年的 ^{137}Cs 含量(Bq/m^2); X_n 为原文献中第 n 年的 ^{137}Cs 含量(Bq/m^2); T 为 ^{137}Cs 的半衰期,30.2 年。

2 结果与分析

2.1 土壤粒度的坡面分布特征

土壤粒度分析结果显示,各粒度参数随深度增加

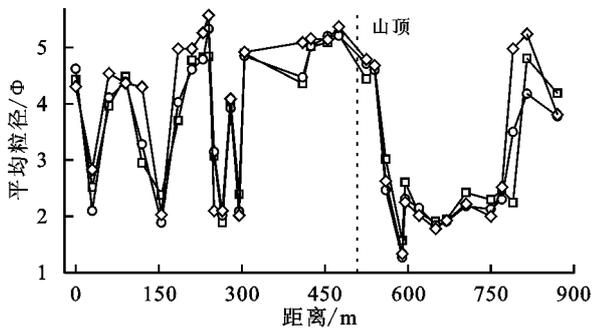


图 2 坡面土壤粒度和分选性沿样线的变化

坡面土壤以细沙(2~4Φ)为主(39.8%),中沙(20.3%)和粉粒(28.4%)是重要组分,粗沙(6.1%)和黏粒(5.1%)含量较少。黏粒、粉粒和极细沙(3~4Φ)(细颗粒)含量沿样线的变化规律与平均粒径的变化类似,细沙中的较粗(2~3Φ)组分、中沙和粗沙(粗颗粒)含量的变化与之相反(图 3)。除粗沙外的其余组分含量在 NW 坡和 E 坡均存在显著差异($p < 0.05$)。细颗粒在 NW 坡的含量较高,尤其是粉粒,NW 坡的平均含量比 E 坡高 17.7%;粗颗粒中的中沙坡面差异最大,E 坡平均比 NW 坡高 12.6%。各

无明显变化,两坡土壤粒径和分选性均有剧烈的波动变化。NW 坡(4.0Φ)的土壤明显比 E 坡细(2.9Φ);分选性比 E 坡略好,但两坡分选程度均为“分选差”。NW 坡的沙地采样点(样点 2,6,12,14)土壤颗粒粗,平均粒径比 NW 坡面的总体平均值小 1.8Φ。E 坡沙地颗粒较粗(2.3Φ),其中位于冲沟下部的样点 23 显著变粗,坡顶和坡底的沙黄土区域土壤较细(4.5Φ)。对位于坡顶附近的耕地,E 坡的坡耕地粒径比 NW 坡粗 0.5Φ(图 2)。

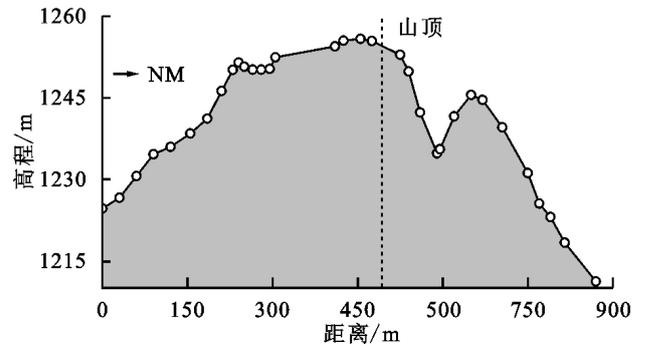
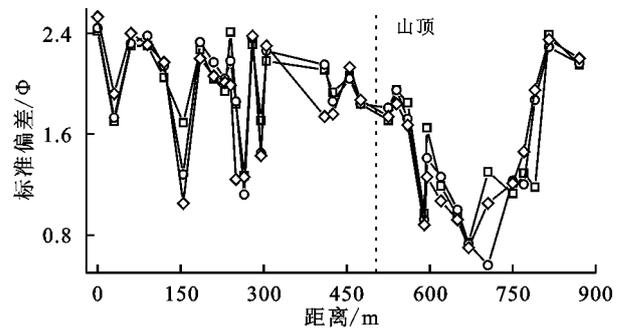


图 1 沿样线的坡面地形、采样点分布和土地利用示意图



组分含量在两坡面变化程度最小的为细沙(变异系数 16.6%),最大的为粗沙(变异系数 114.8%)。

2.2 土壤侵蚀速率

^{137}Cs 含量的变化显示,对整个坡面,土壤侵蚀速率波动变化明显,NW 坡中部偏下土壤侵蚀速率最小[平均 7 281.5 $t/(km^2 \cdot a)$],E 坡的沙地最大[平均 18 484.5 $t/(km^2 \cdot a)$]。对 NW 坡,土壤侵蚀速率从坡脚到坡中减小,从坡中到坡上增大。坡底耕地(样点 1~4)和下部退耕地(样点 5~7)平均侵蚀速率类似,坡面中部偏下(样点 8~10)为退耕草地,地势平

缓(图 1),土壤侵蚀为整个坡面最小。坡面中上部为退耕地,其中覆沙区域(样点 11—14)侵蚀速率和波动性大于无沙区域(样点 15,16)。坡面上部耕地(样点 17—19)侵蚀速率大于其相邻的退耕地。对 E 坡,由坡顶向下土壤侵蚀速率逐渐减小。E 坡上部耕地(样点 20—21)侵蚀速率较小,中部为沙地(样点 22—31)侵蚀严重,尤其是其中发育冲沟的部位[27 115.9 t/(km²·a)]侵蚀最严重,有植被的区域侵蚀速率较发育冲沟的风积沙覆盖区域(沙地)(样点 23—31)小,坡面下部种植柠

条、沙柳的沙黄土区域侵蚀速率较沙地极显著减小($p < 0.01$)。对位于坡顶附近的耕地,E 坡耕地侵蚀速率小于 NW 坡(图 4)。基于当地盛行风向,E 坡为背风坡,当土壤仅发生风蚀时,E 坡侵蚀最小,甚至发生沉积,然而本研究显示,E 坡中部发育冲沟的部位侵蚀速率为整个坡面最大,可见,水蚀度该坡面土壤侵蚀的贡献远大于风蚀,是该坡面的主要侵蚀方式。综上,坡面部位、坡度、植被、土壤类型、土地利用类型和侵蚀方式均影响坡面土壤侵蚀速率。

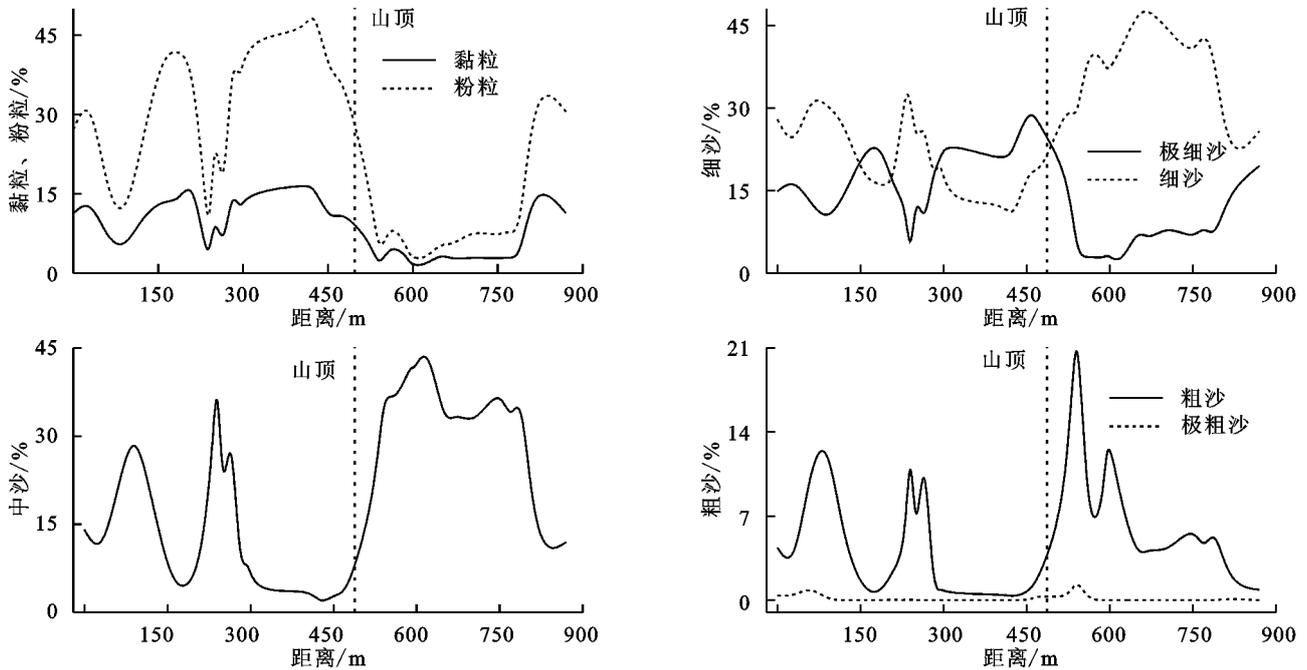


图 3 坡面土壤组分含量沿样线的变化

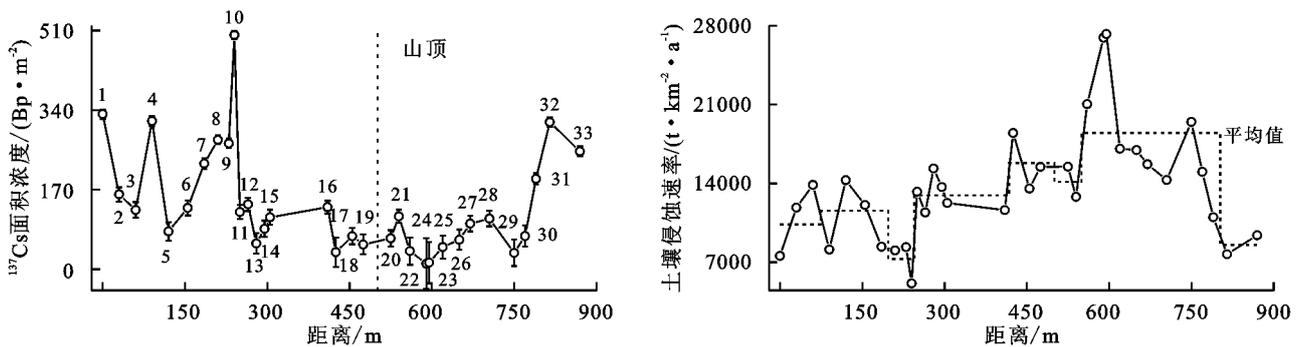


图 4 ¹³⁷Cs 含量和土壤侵蚀速率的坡面分布

2.3 颗粒粒径和土壤侵蚀速率坡面分异的影响因素

2.3.1 地形、植被、土壤类型和土地利用类型的影响

颗粒粒径和土壤侵蚀速率的坡面分异均指示了坡面部位、坡度、植被、土壤类型和土地利用类型的影响。对样线代表性采样点的分析表明,风积沙的可蚀性大于沙黄土(表 1 a, b 组),NW 坡上部侵蚀速率大于坡脚(表 1 d 组),耕地侵蚀速率大于退耕地(表 1 e 组)。对整个采样线,无论坡面部位和土壤类型,总体上平均侵蚀速率沙地[18 484.5 t/(km²·a)]>耕地

[12 671.1 t/(km²·a)]>退耕地[9 435.5 t/(km²·a)]。此外,侵蚀力复合效应也对土壤侵蚀速率变化有总要贡献。如坡顶附近的耕地(表 1 c 组),土壤类型、土地利用类型、坡面部位类似,两坡坡度均较小,E 坡坡度略大于 NW 坡,故 E 坡水蚀应不小于 NW 坡;然而,¹³⁷Cs 结果显示 NW 坡侵蚀速率较大。主要原因可能是 NW 坡为迎风坡,坡顶附近土壤风蚀速率较大,部分被侵蚀土壤颗粒在背风坡的沉积也减小了 E 坡土壤净流失,从而造成 NW 坡侵蚀速率大于 E 坡。

表 1 土地利用类型、坡面部位和土壤类型对土壤侵蚀速率和组分含量的影响

分组编号	a		b		c		d		e	
	耕地, NW 坡脚		退耕地, NW 坡中		耕地, 沙黄土		耕地, 沙黄土		NW 坡下部, 风积沙	
	沙黄土	风积沙	沙黄土	风积沙	NW 坡顶	E 坡顶	NW 坡脚	NW 坡上部	耕地	退耕地
平均坡度/(°)	11.0	6.0	6.6	5.8	5.5	8.2	8.5	5.5	6.0	6.8
侵蚀速率/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	7846.5	12855.4	9082.1	12636.3	15831.1	14151.2	10350.9	15831.1	12855.4	11580.9
样点编号	1,4	2,3	8~10, 15,16	5~7, 11~14	17~19	20,21	1~4	17~19	2,3	5~7

为明确各因素(侵蚀动力之外)对土壤侵蚀速率的贡献,使用 IBMSPSS 19 进行主成分分析。坡面部位用采样点距离坡顶的距离表示(m);坡度为在每个采样点测量的度数(°);土壤类型和土地利用类型分为:耕地—风积沙、耕地—沙黄土、退耕地—风积沙、退耕地—沙黄土、沙地五类;植被用盖度表示(%)。结果显示,对整个样线、NW 坡和 E 坡均可提取 2 个主成分,4 个因素均被选入。对整个坡面,第一主成分与坡度、土壤类型和土地利用类型密切相关,2 个主成分对侵蚀速率的累积解释率为 69.6%。对 NW 坡,第一主成分与植被、土壤类型和土地利用类型密切相关,2 个主成分对侵蚀速率的累积解释率为 80.6%。对 E 坡,第一主成分与植被、坡面部位密切相关,2 个主成分对侵蚀速率的累积解释率达到

82.1%(表 2)。逐步线性回归分析结果显示,在整个样线上,坡面部位、植被、土壤类型和土地利用类型与土壤侵蚀速率的变化显著相关($R^2=0.63$)。E 坡植被、土壤类型和土地利用类型与土壤侵蚀速率的变化显著相关($R^2=0.60$)。NW 坡,采样用进入法建立的线性回归模型与土壤侵蚀速率的变化显著相关($R^2=0.53$),然而却难以用其中的部分因子较好地表达土壤侵蚀变化,说明各个因子的综合作用效果更明显,部分因子的主导效应较弱。

可见,考虑坡面部位、坡度、植被、土壤类型和土地利用类型的线性回归模型对土壤侵蚀速率的坡面变化表达有限($0.53 \leq R^2 \leq 0.64$)。主要原因是分析中仅考虑下垫面因素,而未考虑发生土壤侵蚀的动力因素(风力和降雨)。

表 2 主成分分析结果

采样区域	主成分	初始特征值			提取平方和载入		
		合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
样线	1	1.544	38.6	38.6	1.544	38.6	38.6
	2	1.238	31.0	69.6	1.238	31.0	69.6
	3	0.816	20.4	90.0			
	4	0.402	10.1	100.0			
NW 坡	1	2.163	54.1	54.1	2.163	54.1	54.1
	2	1.061	26.5	80.6	1.061	26.5	80.6
	3	0.708	17.7	98.3			
	4	0.068	1.7	100.0			
E 坡	1	2.154	53.8	53.8	2.154	53.8	53.8
	2	1.131	28.3	82.1	1.131	28.3	82.1
	3	0.660	16.5	98.6			
	4	0.055	1.4	100.0			

注:土壤类型和土地利用类型使用 1 个因子表示。

2.3.2 侵蚀动力的影响 在水蚀风蚀交错带,土壤侵蚀是水力和风力交错作用的结果。交错分布的风蚀地貌和水蚀地貌直观展示了风水交错侵蚀效应,本研究所在流域典型的流水地貌(如侵蚀沟道)占 32.7%,风沙地貌(如片状分布的风积沙)占 12.1%。除地貌特征外,侵蚀速率也指示了风蚀和水蚀对总侵蚀的贡献。NW 坡为风力侵蚀的迎风坡,有效风蚀能在所有坡向坡面中最大;E 坡为背风坡,有效风蚀能在所有坡向坡面中最小。即在其他条件类似的情况下,NW 坡风蚀潜能最大,E 坡最小。然而,¹³⁷Cs 示

踪结果显示,两坡面均发生严重侵蚀,且 E 坡中部的沙地侵蚀最剧烈,坡中植被稀疏的覆沙区域发育侵蚀沟,表明水蚀对 E 坡的土壤侵蚀有巨大贡献。此外,典型采样点土壤颗粒粒径分布也提供了风蚀和水蚀对总侵蚀贡献差异的证据。在 NW 坡,风力和水力对土壤颗粒的输移方向相反,风力沿坡面向上输移侵蚀物质,坡顶附近侵蚀最为剧烈(风力较大且为耕地);降雨顺坡面向下输移侵蚀物质,坡下部和平缓区域侵蚀较小,甚至可能发生沉积。该坡面从坡脚到坡顶逐渐增大的侵蚀速率虽然受植被、土壤类型、土地

利用类型等的共同影响,也反映了风蚀的重要影响。此外,土壤颗粒分选性的变化也为迎风坡风蚀的重要性提供了重要依据,因为无论风力还是水力侵蚀,对颗粒的分选都随搬运距离的增大逐渐变好^[31-32]。水力搬运使坡面下部采样点的分选性比坡面上部好,风力搬运反之。对抗动较小的地埂或未耕作覆沙区域(采样点 2,6,12,14),分选性逐渐变好,表明当地盛行西北风对土壤颗粒的分选效应强于水力向下搬运的分选效应。然而,要定量区分风蚀和水蚀对总侵蚀速率的贡献,还需进一步研究。

3 结论

沿采样断面,土壤侵蚀速率、粒度分布及其组分含量均存在明显波动变化,且存在显著的坡面差异($p < 0.05$)。丘顶附近颗粒最细,E坡沙地颗粒最粗,NW坡土壤颗粒较E坡细。 $>3.0\Phi$ 的细颗粒含量沿样线的变化规律与平均粒径的分布规律类似, $<3.0\Phi$ 的粗颗粒含量变化规律与之相反。NW坡中部偏下土壤侵蚀速率最小,E坡的沙地最大。对NW坡,土壤侵蚀速率从坡脚到坡中减小,从坡中到坡上增大。对E坡,由坡顶向下土壤侵蚀速率逐渐变减小。

颗粒粒径和土壤侵蚀速率的坡面变异受坡面部位、坡度、植被、土壤类型和土地利用类型的共同影响。4个因子的综合作用密切相关,部分因子的主导效应较弱。因子共同影响作用对研究坡面的土壤侵蚀的累积解释介于69.6%~82.1%。除下垫面因素外,土壤侵蚀的动力因素(风力和降雨)也是影响土壤侵蚀的重要因素。

然而,¹³⁷Cs示踪和土壤颗粒粒径分析远不能对水蚀和风蚀的具体贡献定量描述,需要在未来的研究中采用新技术方法。此外,单个坡面的土壤侵蚀速率分布度区域的代表性十分有限,需要开展大量研究探寻一般规律。

参考文献:

[1] Field J P, Breshears D D, Whicker J J. Toward a more holistic perspective of soil erosion: Why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions[J]. *Aeolian Research*, 2009,1:9-17.

[2] Bullard J E, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments[J]. *Area*, 2002,34(1):8-16.

[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*,1993,18:1-15.

[4] 唐克丽.黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M].北京:中国科学技术出版社,1993.

[5] 查轩,王斌科,唐克丽.神木六道沟气候及地面组成物质

特征对侵蚀产沙的影响分析[J]. *西北水土保持研究所集刊*,1993,18(2):67-74.

- [6] 蒋冲,陈爱芳,喻小勇,等.黄土高原风蚀和风水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J]. *干旱区研究*,2013,30(3):477-484.
- [7] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J]. *水土保持学报*,2000,16(2):50-56.
- [8] 李秋艳,蔡强国,方海燕.风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J]. *地理科学进展*,2010,29(1):65-72.
- [9] Menzel R G. Transport of strontium-90 in runoff[J]. *Science*, 1960,131:499-500.
- [10] Du J Z, Zhang J, Baskaran M. Applications of short-lived radionuclides(⁷Be, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ¹³⁷Cs and ²³⁴Th) to trace the sources, transport pathways and deposition of particles/sediments in rivers, estuaries and coasts [C]// *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Springer Berlin Heidelberg, 2012:305-329.
- [11] Petrović J, Dragović S, Dragović R, et al. Using ¹³⁷Cs measurements to estimate soil erosion rates in the Pčinja and South Morava River Basins, southeastern Serbia[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016,158/159:71-80.
- [12] Krmar M, Velojić M, Hansman J, et al. Wind erosion on Deliblato (the largest European continental sandy terrain) studied using ²¹⁰Pbex and ¹³⁷Cs measurements [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015,303(3):2511-2515.
- [13] 刘巍,曹月娥,杨建军,等.准东煤田露天矿区土壤¹³⁷Cs剖面分布特征及侵蚀速率估算[J]. *水土保持学报*, 2015,29(3):52-55.
- [14] 张加琼,周学雷,张春来,等.张家口坝上地区农田土壤风蚀的¹³⁷Cs示踪研究[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*,2010,46(6):724-728.
- [15] 成都地质学院陕北队.沉积岩(物)粒度分析及其应用[M].北京:地质出版社,1976.
- [16] Palchan D, Stein M, Almogi-Labin A, et al. Dust transport and synoptic conditions over the Sahara-Arabia desert during the MIS 6/5 and 2/1 transitions from grain-size, chemical and isotopic properties of Red Sea cores[J]. *Planetary Science Letters*, 2013,382(6):125-139.
- [17] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*[M]. Elsevier: Academic Press, 1987.
- [18] 穆桂金,吉启慧.塔克拉玛干地区第四纪沉积物的机械组成特征及其意义[J]. *干旱区地理*,1990,13(2):9-18.
- [19] Zhang X D, Ji Y, Yang Z S, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016,59(2):258-267.

(下转第 22 页)

- zone of the three gorges reservoir, china[J]. Science of the Total Environment, 2014,479/480:258-266.
- [9] Ye Chen, Cheng Xiaoli, Zhang Quanfa. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China; implications for revegetation[J]. Environmental Sciences and Pollution Research, 2014,21(3):2018-2031.
- [10] 常超,谢宗强,熊高明,等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报,2011,26(7):1236-1244.
- [11] 张信宝. 关于三峡水库消落带地貌变化之思考[J]. 水土保持通报,2009,29(3):1-4.
- [12] Yuan Xinzong, Zhang Yuewei, Liu Hong, et al. The littoral zone in the three gorges reservoir, china: Challenges and opportunities [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013,20(10):7092-7102.
- [13] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [14] Adhikari A R, Gautam M R, Yu Zhongbo, et al. Estimation of root cohesion for desert shrub species in the lower colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization [J]. Ecological Engineering, 2013,51:33-44.
- [15] Zhou Zhengchao, Shanguan Zhouping. Soil anti-scourability enhanced by plant roots[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2005,47(6):676-682.
- [16] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报,1993,7(3):11-18.
- [17] 查小春,贺秀斌. 土壤物理力学性质与土壤侵蚀关系研究进展[J]. 水土保持研究,1999,6(2):98-104.
- [18] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,等. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探[J]. 水土保持学报,2009,23(5):156-161.
- [19] 朱宏伟,贺秀斌,唐强,等. 三峡库区消落带土壤在周期蓄水影响下的磁性变化[J]. 科技导报,2012,30(9):22-26.
- [20] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等. 三峡库区消落带几种草地根系分布及土壤养分变化[J]. 水土保持研究,2015,22(2):151-157.
- [21] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous manly slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011,84(1/2):70-78.
- [22] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008,305(1/2):207-226.
- [23] Wu T H. Root reinforcement of soil; review of analytical models, test results, and applications to design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013,50(3):259-274.
- [24] 李建兴,何丙辉,谯芸,等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):144-152.

(上接第 6 页)

- [20] Liu X X, Jef V, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments; Implications for riverine input and Holocene monsoon variability [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016,449:41-51.
- [21] 邓智瑞,何青,邢超锋,等. 长江口北槽柱状沉积物粒度分布特征及沉积环境指示意义[J]. 海洋科学,2016,40(1):112-122.
- [22] 李小妹,严平,吴伟,等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. 地理科学,2016,36(8):1269-1276.
- [23] 杨明义,田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展[J]. 地球科学进展,2000,15(6):649-653.
- [24] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957,27(1):3-26.
- [25] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. Journal of Geology, 1922,30:377-392.
- [26] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using Caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Sciences Journal, 1990,35(3):243-252.
- [27] 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.
- [28] 张威,潘少明,张克新,等. 中国大陆 Cs-137 背景值研究[J]. 地理学报,2015,70(9):1477-1490.
- [29] 张平仓. 水蚀风蚀交错带风水两相侵蚀的时空特征研究:以神木六道沟小流域为例[D]. 陕西杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,1997.
- [30] 张平仓,唐克丽. 六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):32-40.
- [31] 魏振海,董治宝,胡光印,等. 若尔盖盆地沙丘形成分布影响因素探讨[J]. 中国沙漠,2009,29(6):1035-1042.
- [32] 葛云龙,逯径铁,廖保方,等. 辫状河相储集层地质模型:“泛连通体”[J]. 石油勘探与开发,1998,25(5):77-79.