

风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失 特征及其对土壤性质影响

苑依笑¹, 王仁德², 常春平¹, 郭中领¹, 李庆²

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设省级重点实验室, 石家庄 050024;

2. 河北省科学院地理科学研究所, 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 石家庄 050011)

摘要: 以河北坝上地区作为典型研究区, 采用野外观测和室内试验分析方法, 通过比较农田与邻近天然草地土壤性质之间的差异, 研究了农田土壤细颗粒物的损失特征及其对土壤理化性质的影响。结果表明: 与风蚀较轻的天然草地相比, 农田土壤中黏粒含量下降 30%, 粉砂含量下降 14%; 土壤细粒物质的损失粒径集中在 0~40 μm , 其中 1.8~24.0 μm 的细颗粒损失最为严重。由于土壤细颗粒物的损失, 土壤砂粒含量相对增加 7%, 砾石含量相对增加 75%, 土壤平均粒径增大 16%, 农田土壤出现明显的粗化、沙化趋势。同时, 农田土壤随着养分含量较高的细颗粒损失而变得贫瘠, 表现为有机质含量减少 29%, 全氮含量减少 24%, 土壤 C/N 比明显下降, 土壤肥力显著降低。土壤细颗粒物的损失对土壤的可风蚀性颗粒含量无明显影响, 土壤风蚀可蚀性的变化趋势不明显。

关键词: 农田风蚀; 细颗粒损失; 土壤理化性质; 风蚀可蚀性; 河北坝上

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0104-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.016

Loss Characteristics of Fine Particles by Wind in Farmland and Its Effect on Soil Properties

YUAN Yixiao¹, WANG Rende², CHANG Chunping¹, GUO Zhongling¹, LI Qing²

(1. College of Resource and Environment Sciences, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological

Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang, 050024; 2. Institute of Geographical Sciences, Hebei

Academy Sciences, Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011)

Abstract: The wind erosion of farmland in the agro-pastoral acetone of northern China is very serious, which causes degradation of soil resources. Taking Bashang district as a typical area of agro-pastoral acetone, by field sampling and comparing the differences in soil properties between farmland and nearby natural grassland, the loss characteristics of fine particles in farmland soils led by wind erosion as well as its impact on soil physical and chemical properties were studied in the paper. The results showed that, compared with natural grasslands with weak wind erosion, the contents of clay and silt in farmlands decreased by 30% and 14%, respectively. The grain sizes of lost soil concentrated in 0~40 μm , of which the loss of fine particles with sizes of 1.8~24.0 μm was the largest. The loss of fine particles in farmland soils resulted in the increase of sand and gravel in farmland soils by 7% and 75%, respectively, also the averaged particle size of soil increased 16%. Those indicate that the farmland soils have serious tendency of coarsening and desertification under the long-time effect of wind erosion. With the loss of fertile fine particles, the soils of farmland became barren. The results showed that the contents of carbon (C) and total nitrogen (N) in farmland soils decreased significantly, with a declining range of about 29% and 24%, respectively. The ratio of C to N (C/N) also declined obviously and the content of soil fertility reduced. However, the loss of fine particles had no significant influence on the proportion of erodible particles in soil. The change of soil erodibility by wind was not obvious in farmland soils.

Keywords: wind erosion of farmland; the loss of fine particles; soil property; soil erodibility by wind; Bashang district of Hebei Province

收稿日期: 2017-10-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(40110251, 41330746, 41630747); 河北省自然科学基金项目(D2013302034, D2014205063); 河北省科学院科技计划项目(17103)

第一作者: 苑依笑(1994—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事土壤风蚀研究。E-mail: yuanyixiao1994@163.com

通信作者: 王仁德(1980—), 男, 河北黄骅人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤风蚀与风沙灾害防治研究。E-mail: wangrendel0@163.com

风蚀是干旱、半干旱地区土地退化的主要驱动力,是土地沙漠化的首要环节^[1]。严重的土壤风蚀使得土壤质地粗化、结构变差、肥力下降,土地可持续生产力降低,造成农作物减产甚至绝收^[2]。风蚀引起的土壤碳排放和养分元素迁移对全球变化亦有重要影响,是深入认识地球—气候系统变化规律的核心课题之一^[3]。中国是世界上风蚀危害严重的国家之一,发生土壤风蚀和受其影响的面积占国土总面积的1/2以上,其中北方旱作农田最为严重^[4]。每年全国因风蚀而弃耕的农田达 $9.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$,损失的有机质、氮、磷等总量高达 $5.59 \times 10^7 \text{ t}$,总价值近170亿元^[5]。因此,加强风蚀对农田土壤理化性质及肥力影响研究具有十分重要意义。

风蚀对土壤的破坏作用很早就引起了国内外学者的关注。一般认为,风蚀导致土壤中细颗粒的损失,产生更沙质的土壤结构^[6]。伴随着土壤细颗粒的损失,土壤容重增加,土壤毛管孔隙度和持水能力降低,土壤结构和团粒的稳定性受到破坏。由于土壤养分主要富集在细颗粒中,细颗粒的损失也造成土壤养分含量及有效性降低^[7]。因此,风蚀导致土壤细颗粒的损失是造成土壤结构破坏和肥力下降的根本原因。研究表明,土壤中不同粒径颗粒的风蚀可蚀性不同,粉砂比黏粒和砂粒更易风蚀^[8], $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径颗粒比其他粒径颗粒更易风蚀^[9]。因此,风蚀作用下土壤细颗粒的损失并不是均一的。目前,相关学者主要通过分析风蚀物来探讨风蚀作用下土壤细颗粒的损失问题^[10],但由于不同粒径颗粒的运动方式和搬运距离不同^[11],并非所有风蚀物都会造成土壤中相应粒径颗粒的损失,所以风蚀物的粒度特征并不能真实反映土壤细颗粒损失的粒度特征。风蚀作用下土壤细颗粒的损失问题还需要进一步研究。国内在风蚀对土壤环境影响的问题研究上,重点关注了风蚀导致的土地沙化和肥力下降问题^[12],对土壤细颗粒损失特征及其与土壤性质变化之间的关系缺乏深刻认识。此外,各个地区风蚀特征不同,造成的土壤细颗粒损失和土壤理化性质变化也有所不同,对此也需要进行针对性的研究。基于此,本文选择土壤风蚀严重的河北坝上地区作为研究区,采用空间换时间的方法,通过对风蚀严重农田与邻近受风蚀影响较弱的天然草地进行比较分析,研究农田风蚀导致的土壤细颗粒损失粒度特征,分析土壤细颗粒损失与土壤理化性质变化之间的内在联系,为深刻认识坝上地区农田风蚀危害,制定合理的农田风蚀治理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在河北省坝上地区康保县境内($41^\circ 25' 24''$ —

$42^\circ 08' 57'' \text{N}$, $114^\circ 11' 21''$ — $114^\circ 55' 57'' \text{E}$)(图1)。该地区地处内蒙古高原南缘,中国北方农牧交错带中部。属温带大陆性季风气候,年均气温 1.2°C ,无霜期92 d,年均降水量约350 mm,年均蒸发量1 762.7 mm,年平均风速2.99 m/s。冬春季节沙尘天气多发,年均大风日数14 d,是土壤风蚀的高发期。该地区原生植被为典型草地,但在过去的200年中,由于人口不断增加,大面积草地被开垦为农田,成为我国典型的农牧交错区。地带性土壤为栗钙土,土壤质地主要为砂质壤土,砾石含量较高,质地松散,养分含量低,内聚力差,为土壤风蚀提供了物质基础,尤其是在干旱多风的春季,土壤风蚀强度更大。

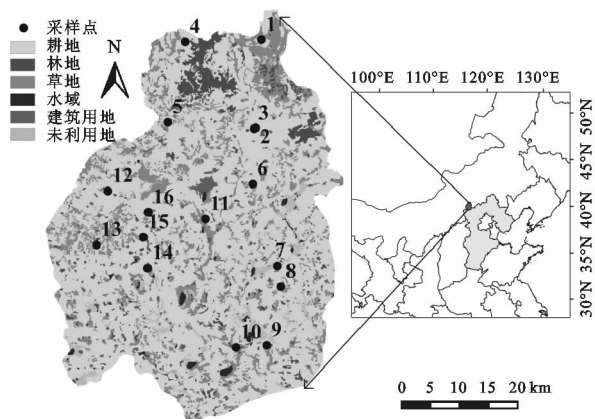


图1 野外观测点位置

1.2 采样点选择

根据前人的研究结果^[13],坝上地区农田风蚀强度远高于草地,前者的风蚀强度是后者的25倍。风蚀强度的差异必然导致农田与其邻近天然草地土壤粒度组成的差异^[14]。因此,通过农田与其邻近天然草地土壤质地比较,分析风蚀造成的农田土壤细颗粒损失。参考研究区土地利用类型图,并通过野外实地调查,选取了16组典型取样点(图1)。每组取样点包含农田和与农田相邻的天然草地2种地类。考虑到当地冬春季的主导风向为西北风,在选择取样点时要求天然草地位于农田的西侧或者北侧,以尽量避免农田产生的风蚀物对草地土壤性质产生影响;并且要求天然草地没有发生明显的退化现象,植被盖度在40%以上。各采样点的具体情况见表1。

1.3 采样和分析方法

于2016年4月春耕播种之前进行采样。在农田和天然草地上分别设置 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的采样区,且二者间距不超过40 m。研究区农田耕作层厚度在20—25 cm。因此,农田和天然草地的土样采集深度确定为0—20 cm。在采样区内均匀布设10个采样点,采集表层土壤样品,均匀混合后取2.0 kg作为该采样点的表土样品。本次共采集表土样品32个,农田和草地各16个。

表 1 采样点基本情况

样点编号	地理位置	地表状况	
		农田	天然草地
1	南城子村西南 2 km	秋翻耕耙平地,粗化严重	位于背风坡,有灌丛沙堆
2	北井子村南 1 km	菜地,地表较硬,粗化严重	草滩,植被较好
3	北井子村西南 1 km	翻耕地,地表松软,砾石含量高	土壤质地较细
4	三义村东 1 km	翻耕地,粗化严重	土壤质地较细
5	石柱梁村北 2 km	翻耕花生地,粗化严重	植被较好
6	西伙房村南 1.5 km	秋翻耕耙平地,土壤较细,砾石含量低	植被较好,地表较硬
7	李占地正北 1.5 km	翻耕地,犁底层被翻上,地表粗化严重	盖度较好,土地紧实
8	白家营西南 2 km	翻耕地,犁底层被翻上,砾石含量低	盖度较好,土层较薄
9	永旺村正东 1.5 km	翻耕地,土壤胶泥质,砾石含量低	盖度较好,砾石含量低
10	吉石河正南 1 km	翻耕地,砾石含量低	盖度较好,地表较硬
11	二十顷正东 1.5 km	翻耕地,土壤粗化严重	草滩,植被较好
12	三面井村东南 1 km	翻耕地,犁底层被翻上,沙化严重,砾石含量低	盖度较好,土壤质地较硬
13	三台坊东南 2 km	翻耕地,土壤细颗粒含量较高	盖度较好,有积沙
14	西北营正南 1 km	翻耕地,砾石含量高,粗化沙化	盖度较好,土壤质地较硬
15	黄花洼西北 3 km 山坡	春翻耕耙平地,砾石含量高	盖度较好,土壤质地较硬
16	王善营南 0.5 km 山坡	春翻耕耙平地,砾石含量高	盖度较好,土壤质地较硬

将野外采集的表土样品带回实验室自然风干后分成 2 份,1 份过 2 mm 平筛,去除残留的枯枝烂叶、大土块和砾石。经前期处理后,使用马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer 3000)对土壤质地进行分析,根据国际土壤质地分类标准^[15],将土壤分为黏粒(0~2 μm)、粉砂(2~20 μm)、砂粒(>20 μm)。取其中部分土样再过 0.25 mm 平筛,用于土壤有机碳和全氮含量测定。有机碳含量采用硫酸—重铬酸钾氧化法测定,土壤全 N 含量采用凯氏定氮法测定。另一份采用平筛筛分法^[16-17],分析土壤的干团聚体粒度组成,粒径区间分为>2.2~1.1~0.85,0.85~0.5,0.5~0.1,0.1~0.05,<0.05 mm 7 个等级;所有样品的理化分析实验均在河北省科学院地理科学研究所分析测试中心进行。数据分析主要采用 Excel 和 SPSS 19.0 软件,图表绘制主要采用 Excel 和 Origin 9.1 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤细颗粒损失粒度特征

根据农田与邻近天然草地土壤粒度组成的比较

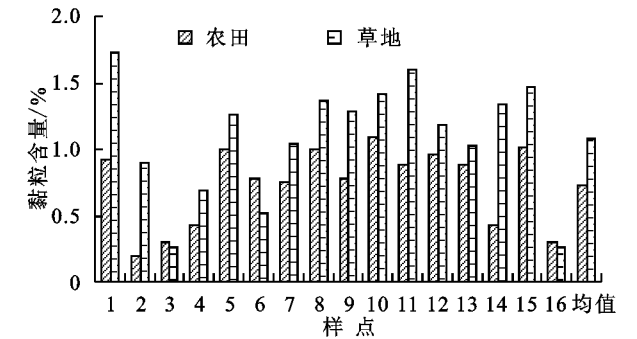
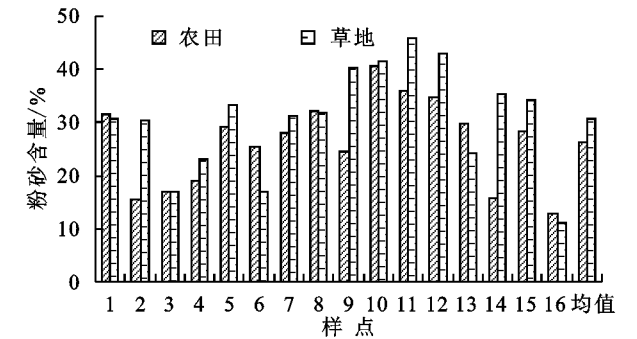


图 2 农田与天然草地土壤黏粒、粉砂含量比较

根据不同样点土壤细颗粒损失粒度特征,大体可将农田 16 个样点的土壤细颗粒损失特征分为 2 类:

结果,农田土壤在细颗粒部分的粒度组成已发生明显变化。16 组典型样点中,有 13 组样点出现了农田土壤黏粒和粉砂含量低于草地的现象(图 2),这说明风蚀造成土壤细颗粒损失是一种普遍现象。进一步分析表明,农田土壤中黏粒的百分含量为 0.73%,与天然草地的百分含量(1.08%)相比下降了 30%;方差分析表明,2 种地类的土壤黏粒含量差异显著($P<0.05$)。农田土壤中粉砂的百分含量为 26.29%,与天然草地粉砂的百分含量(30.64%)相比下降了 14%,但差异不显著($P>0.05$)。土壤中黏粒含量的下降幅度高于粉砂,这与 Chepil^[8]在美国大平原的研究结果存在差异,这可能与坝上地区土壤中黏粒含量较低有关。

农田和草地土壤粒度分布曲线的走势相对一致(图 3),说明农田和草地的土壤母质较为相似。通过与草地对比,在粒径<40 μm 范围内农田土壤颗粒含量低于草地,累积含量较草地减少了 7%,其中在 1.8~20 μm,农田与草地的差距较大且稳定,说明风蚀作用下该粒径范围内农田土壤细颗粒损失最为严重。



第 1 类包含 11 个样点,以 9 号样点为例(图 4a),表现为农田土壤细颗粒含量显著低于草地,土壤细颗粒损

失的最大粒径值在 10~55 μm ;第 2 类包含 5 个样点(1,6,10,13,16 号),以 6 号样点为例(图 4b),同样表现为农田土壤细颗粒含量低于草地,但细颗粒损失的最大粒径值在 80~170 μm ,且极细颗粒部分(0~12 μm)农田土壤颗粒含量较高。各样点土壤细颗粒损失的粒径范围有所不同,可能是土壤质地和风沙环境的差异造成的。至于第 2 类情况中,农田在极细颗粒部分颗粒含量高于草地,可能与这些样点的农田风积作用较强,土壤黏粉粒含量增加有关。

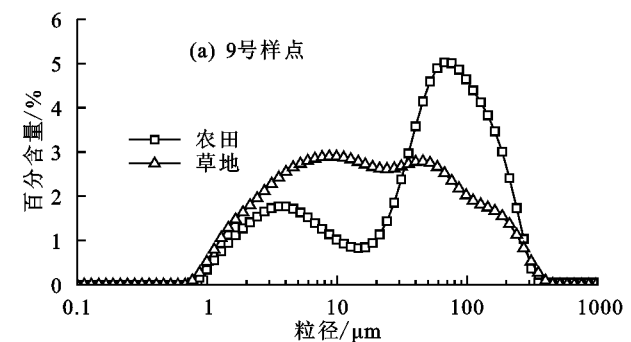


图 4 农田与草地土壤粒度分布对比曲线

2.2 细颗粒损失对土壤性质的影响

2.2.1 细颗粒损失对土壤粒度组成的影响 16 组样点中农田和天然草地的土壤砂粒含量均值分别为 72.98%,68.28%,与天然草地相比,农田土壤中砂粒含量增加了 7%(图 5a),但未达到显著水平($P>0.05$)。这主要是由于坝上地区砂粒含量较高,农田土壤细颗粒的损失导致粒径较粗的砂粒含量相对增加,农田和天然草地的砂粒含量差异不明显。

砾石是指土壤中粒径 $>2\text{ mm}$ 的矿物颗粒^[18]。筛分结果表明(图 5b),草地土壤中砾石含量在 1%~13%,平均为 4%;农田土壤中砾石含量在 1%~15%,平均为 7%,较草地增加了 75%,土壤砾石含量差异显著($P<0.05$),且 16 组采样点中,有 14 组样点的农田砾石含量远高于草地,这说明农田土壤细颗粒损失后,土壤砾石含量普遍增高。

对农田和天然草地土壤样品的平均粒径进行比较分析(图 5c)后得出,农田土壤平均粒径(119.4 μm)明显大于相邻的天然草地土壤平均粒径(103.01 μm),土壤平均粒径增大 16%,与天然草地差异显著($P<0.05$)。且 16 组样点中,有 14 组样点出现这种情况,说明农田土壤细颗粒的损失造成土壤粗颗粒含量相对增加,平均粒径变大,土壤出现了明显的粗化现象。

农田土壤的砂粒和砾石含量相对增加,土壤平均粒径变大,农田土壤呈粗化和沙化趋势。天然草地由于有植被保护,并且地表较硬,在没有发生严重退化的情况下风蚀程度一般较弱,风力对细颗粒物的搬运作用不明显。草地在开垦为农田后,由于缺少植被覆盖,地表长期裸露,加上土层松软,风蚀对土壤颗粒的

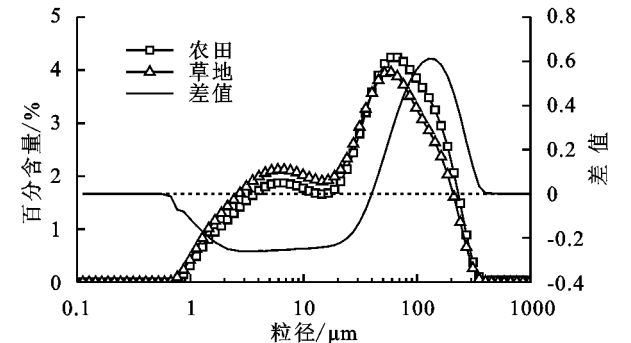
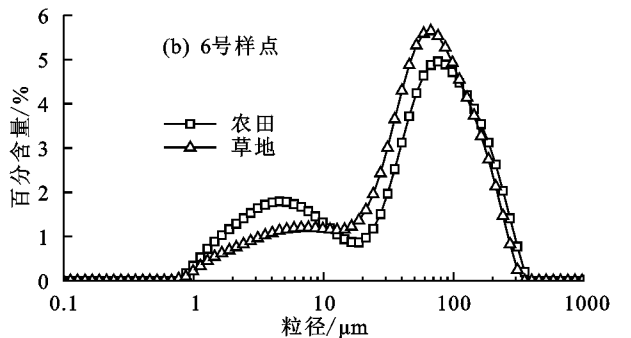


图 3 农田与草地土壤粒度分布对比曲线



选择性搬运会导致土壤中细颗粒的大量损失,从而产生更沙质的土壤结构。

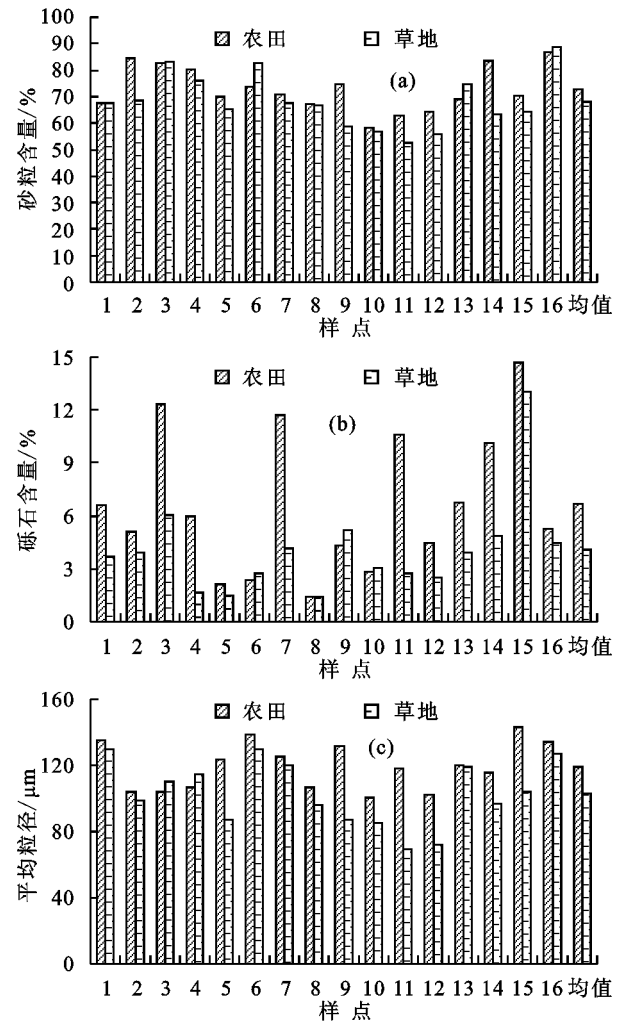


图 5 农田与草地土壤粒度组成比较

2.2.2 细颗粒损失对土壤肥力的影响 土壤养分主要富集于细颗粒物中^[19]。由于风蚀导致土壤中的细颗粒被吹蚀搬运,土壤有机质和氮素等养分含量也随之减少^[20]。本研究结果表明(图 6),天然草地和农田的土壤有机质含量均值分别为 27.08,19.53 g/kg,与天然草地相比,农田有机质含量下降了 29%,达极显著水平($P<0.01$),且 16 组样点中有 14 组样点出现农田土壤有机质含量小于草地的现象。农田表层土壤全氮含量的

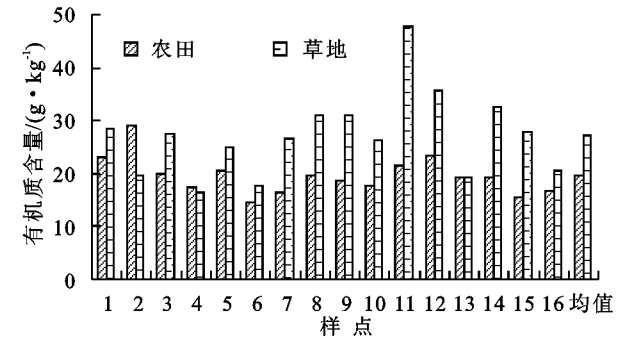


图 6 农田与草地土壤有机质和氮含量比较

土壤碳氮比(C/N)是估算土壤碳氮平衡状况的重要指标,是评价土壤肥力的关键因素^[21]。C/N 比值越小,微生物分解和氮的矿化速率越快,在氮元素满足植物需求的条件下,需加入更多的碳以保持活性,而造成植物缺碳现象。C/N 比值越大,微生物分解速率越慢,土壤中的有效氮素消耗越多,植物缺氮较为严重。研究结果(图 7)表明,农田土壤 C/N 值普遍低于草地,说明在农田细颗粒物损失,C 和 N 含量减少的情况下,C 元素的衰减速度明显快于 N 元素,这可能导致植物生长过程中 C 元素供应不足的情况更加严重。

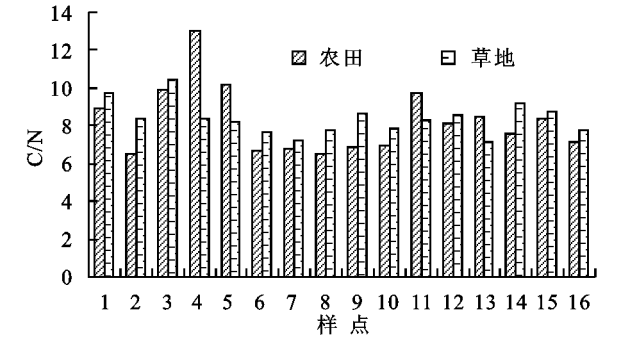


图 7 农田与草地土壤 C/N 比较

本研究中,有机质和全氮含量与黏粒、粉砂含量呈极显著正相关($P<0.01$),与砂粒含量呈极显著负相关($P<0.01$)(表 2),说明农田土壤细颗粒物质的损失导致了土壤有机质和氮素含量的减少,这也印证了前人的农田土壤粗粒化演变过程中伴随着土壤有机碳和全氮含量的衰减^[22]。伴随着土壤细颗粒物的损失和有机质、氮素含量的降低,农田地表土壤的 C/N 呈下降趋势,植物生长过程中土壤 C 元素供应不足更为严重,这可能阻碍植物光合作用,抑制作物生长。

变化趋势与有机质一样,表现为农田土壤的全氮含量(1.43 g/kg)小于草地(1.88 g/kg),氮素含量下降了 24%,达显著水平($P<0.05$),且 16 组样点中有 15 组样点呈此变化趋势。2,4 号样点的有机质含量以及 2 号样点的全氮含量与其他样点的变化趋势有所不同,这可能由于 2,4 号样点为菜地,农家肥施用较多,土壤团聚体结构有所改善,从而增强了土壤保水保肥性能,增加了土壤有机质和氮含量。

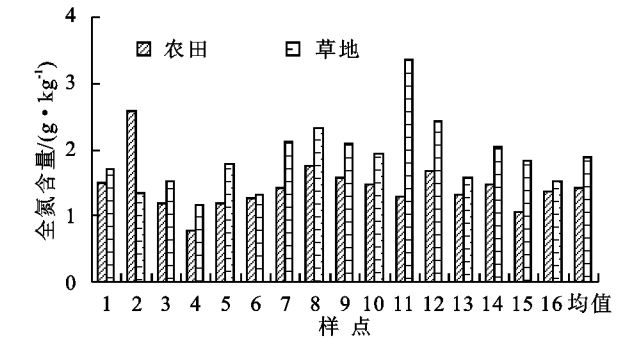


表 2 有机质、全氮含量与土壤黏粒、粉砂、砂粒含量的相关性

土壤肥力指标	黏粒		粉砂		砂粒	
	相关	显著	相关	显著	相关	显著
	系数	水平 P	系数	水平 P	系数	水平 P
有机质	0.540 **	0.001	0.541 **	0.001	-0.544 **	0.001
全氮	0.469 **	0.007	0.484 **	0.005	-0.486 **	0.005

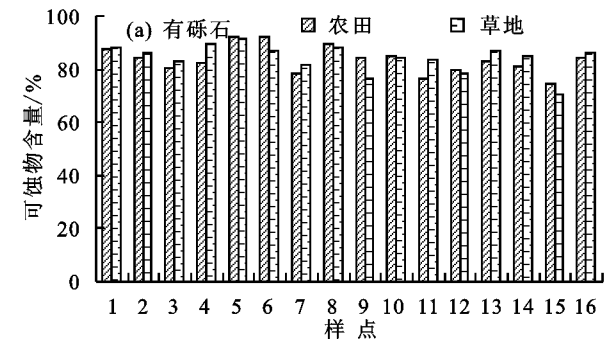
注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.3 细颗粒损失对土壤风蚀可蚀性的影响

土壤风蚀可蚀性是指土壤遭受风蚀的敏感性程度^[9]。借鉴国外研究成果^[23],本文将粒径 <0.85 mm 的土壤颗粒及团聚体定义为可风蚀性颗粒。可风蚀性颗粒含量越高,土壤的可风蚀性越强。一般认为^[24],长期风蚀会导致土壤中粉砂与黏粒含量降低,有机质含量下降,土壤容重增加,土壤团聚体结构和稳定性变差,土壤抗剪强度降低,从而使土壤风蚀可蚀性增强。本研究分析表明(图 8a),在 16 组样点中,只有 7 组样点的农田土壤可风蚀性颗粒含量高于草地,农田土壤与草地土壤风蚀可蚀性的差异不明显($P>0.05$)。农田土壤细颗粒物损失后,土壤风蚀可蚀性并没有出现明显的趋势性变化,究其原因这可能与坝上地区农田土壤中砾石含量较高有关。

由图 5b 可知,细颗粒损失造成了农田土壤中砾石含量显著增加($P<0.05$)。砾石覆盖地表,具有降低土壤风蚀可蚀性的作用^[25]。多砾石农田土壤风蚀可蚀性变化趋势与少砾石农田有所区别^[17],在不考虑砾石影响的情况下(图 8b),分析表明农田和天然草地的土壤可风蚀性颗粒含量均值分别为 89.38%,87.88%,农田土壤风蚀可蚀物含量略高,且 16 组样点中有 11 组样点表现出农田土壤风蚀可蚀物含量高

于草地,说明在不考虑砾石的情况下,土壤细颗粒物的损失会导致农田土壤风蚀可蚀性增强。只是由于土壤风蚀可蚀性的影响要素众多,风蚀导致的细颗粒



损失和砾石含量增加对其影响有限。因此,土壤风蚀可蚀性的变化趋势不显著,土壤细颗粒物损失对多砾石农田土壤风蚀可蚀性的影响还需要深入研究。

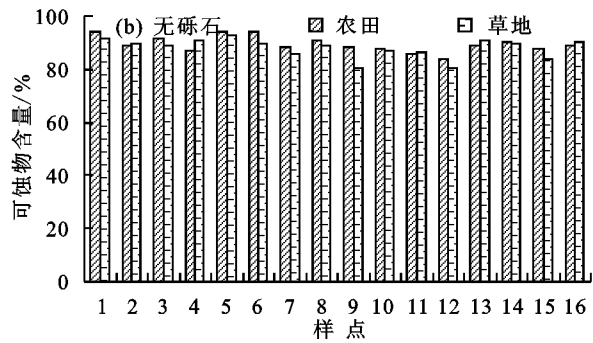


图 8 农田与草地土壤可风蚀性颗粒含量比较

3 结 论

(1)与天然草地相比,土壤黏、粉粒等细颗粒物损失严重,黏粒含量下降 30%,粉砂含量下降 14%。由于风沙环境和土壤质地的差异,各样点农田土壤细颗粒的粒度损失特征也不尽相同,土壤细颗粒损失的粒径范围主要集中在 0~40 μm,其中 1.8~24 μm 的土壤细粒物质损失最为严重。

(2)土壤细颗粒物的损失给当地的土壤环境和土壤性质带来了很大的影响,导致土壤砂粒和砾石含量相对增加,土壤平均粒径变大,农田土壤质地出现明显的粗化、沙化趋势。

(3)富集于土壤细颗粒物中的有机质和氮素等养分伴随着土壤的粗化而逐渐减少,其中有机质含量下降 29%,氮素含量下降 24%,且在作物生长过程中 C 元素短缺的情况更为严重,导致农田土壤肥力明显降低。

(4)农田与天然草地在土壤可风蚀性颗粒含量上差异较小,土壤风蚀可蚀性没有明显的趋势性变化,这主要与坝上地区农田土壤中砾石含量较高有关。

参考文献:

[1] 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等.我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制[J].水土保持学报,2007,21(3):1-5,80.

[2] Jason P F, Jayne B, David D B, et al. The ecology of dust[J]. Front of Ecological Environment, 2010, 8(8): 423-430.

[3] 苏永中,赵文智.土壤有机碳动态:风蚀效应[J].生态学报,2005,25(8):2049-2054.

[4] Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, et al. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy farmland of Inner Mongolia, north China [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(2): 175-185.

[5] 罗万银,董治宝.风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J].地理科学进展,2005,24(4):75-83.

[6] 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010: 157-158.

[7] Vogel C, Heister K, Buegger F, et al. Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(4): 427-442.

[8] Chepil W S. Sedimentary characteristics of dust storms: I. Sorting of wind-eroded soil material[J]. American Journal of Science, 1957, 255(1): 12-22.

[9] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J].土壤,2014,46(2):204-211.

[10] Li J R, Okin G S, Epstein H E. Effect of enhanced wind erosion on surface soil texture and characteristics of wind-blown sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(G2): 157-163.

[11] Pye K, Tsoar H. Aeolian sand and sand dunes[M]. London: Unwin Hyman Ltd., 1990.

[12] Zhao H L, Yi X Y, Zhou R L, et al. Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia[J]. Catena, 2006, 65(1): 71-79.

[13] 杨钦,郭中领,王仁德,等.河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.

[14] 董治宝,陈广庭.内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):84-90.

[15] 李天杰,赵烨,张科利,等.土壤地理学[M].北京:高等教育出版社,2003:36-37.

[16] Wang R D, Guo Z L, Chang C P, et al. Quantitative estimation of farmland soil loss by wind-erosion using improved particle-size distribution comparison method (IPSDC)[J]. Aeolian Research, 2015, 19: 163-170.

[17] Guo Z L, Chang C P, Wang R D, et al. Comparison of different methods to determine wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 42-49.

[18] 李燕,高明,魏朝富,等.土壤砾石的分布及其对水文过程的影响[J].中国农学通报,2006,22(5):271-276.