

青藏高原沙尘铁微观理化的自动化表征

秦怡兰¹, 杨东², 姚一波³, 金妞^{4*}

¹宝鸡文理学院, 自然地理学院, 陕西 宝鸡

²西安航天复合材料研究所, 陕西 西安

³陕西省文物保护工程有限公司, 陕西 西安

⁴河北工程大学, 地理科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年1月9日; 录用日期: 2025年2月20日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

长距离传输的含铁沙尘不但能够改变区域乃至全球辐射平衡, 还是海洋初级生产所需营养物质的主要来源, 对全球气候和环境变化有重要影响。矿物分析显示不同源区沙尘铁的空间分布和效应存在显著差异, 但量化粒径相关的沙尘铁矿物组成尚缺乏有效手段。本研究借助计算机控制扫描电子显微镜(CCSEM)测定青藏高原地表风蚀释放的27,190个沙尘单颗粒, 定量获得沙尘铁的数量丰度、粒径、形貌特征, 及其矿物组成等信息。结果显示: (1) 高原沙尘铁单个粒子的粒径分布和形貌参数存在地域差异; (2) 绿泥石、伊利石和蛭石是高原含铁沙尘粒子的主要矿物类型, 共占含铁颗粒总数的80.3%~84.1%; (3) 高原沙尘铁粒度分布的峰值粒径介于1.3~2.0 μm , 而质量则富集在较粗粒子部分(3.2~7.9 μm)。CCSEM提供的微观理化定量数据可用于模式研究, 提高气候和生物地球化学循环模拟的准确性。

关键词

青藏高原, 沙尘铁, CCSEM, 粒径分布, 矿物组成

Automated Characterization of Microphysical and Chemical Iron-Containing Mineral Dust in the Qinghai-Xizang Plateau

Yilan Qin¹, Dong Yang², Yibo Yao³, Niu Jin^{4*}

¹College of Physical Geography, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji Shaanxi

²Xi'an Aerospace Composite Materials Research Institute, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Cultural Relics Protection Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴School of Geographic Science and Engineering, Hebei University of Technology, Handan Hebei

Received: Jan. 9th, 2025; accepted: Feb. 20th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 秦怡兰, 杨东, 姚一波, 金妞. 青藏高原沙尘铁微观理化的自动化表征[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(2): 241-251. DOI: 10.12677/ag.2025.152025

Abstract

Iron-containing mineral dust aerosols can induce perturbation of regional and global radiation balance, and impact the global carbon cycle and climate change by acting as a major source of nutrients for marine primary production. The characterization of mineral dust showed spatial variations in the distributions of iron-containing particles and their potential effects on climate and environment. However, a knowledge gap remains in the size-resolved mineralogical compositions of iron-containing particles due to the lack of effective analytical methods. In this study, 27,190 individual mineral dust particles released by a simulated wind erosion process on the surface soil from the Qinghai-Xizang Plateau were determined by a computer controlled scanning electron microscopy (CCSEM) system. The quantitative results of particle size, morphology and mineral compositions of iron-containing mineral dusts show that: (1) A spatial variation remained in the particle size distribution and morphological properties of the iron-containing mineral dust particles all over the Plateau. (2) Chlorite, illite and vermiculite predominated iron-containing mineral dusts of the plateau, accounting for 80.3%~84.1% in numbers; (3) The amount of iron-containing mineral dusts is enriched in the fine particle size mode (peak size range 1.3~2.0 μm), whilst their mass is enriched in the coarse particles (3.2~7.9 μm). CCSEM is capable to provide quantitative data on the microphysical and chemical properties of iron-containing mineral dusts, which may improve the accuracy of climate and biogeochemical models.

Keywords

Qinghai-Xizang Plateau, Iron-Containing Mineral Dusts, CCSEM, Size Distribution, Fe-Bearing Minerals

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沙尘作为大气气溶胶的重要组成部分，对全球气候和环境有重要影响。沙尘不但通过吸收和散射太阳辐射，直接改变地-气系统的辐射收支平衡，还可通过改变云滴和冰晶粒子尺度等云微物理特性及其生命周期，间接影响辐射平衡[1]。铁是沙尘气溶胶中重要的元素组成，通过为海洋初级生产力提供营养物质，间接影响海洋生物固碳和地球气候系统的演化[2]。全球每年约有 1000~3000 Tg 的沙尘气溶胶进入大气环境，约占年度全球气溶胶排放总量的一半[3]。亚太中纬度的内陆干旱区每年向大气注入约 800 Tg 的沙尘粒子，是全球范围内受沙尘活动影响最显著的区域之一[4]。青藏高原地区沙尘气溶胶释放量则达到 220 Tg，其规律和影响日益受到关注[5]。

青藏高原作为地球的“第三极”，平均海拔超过 4000 m。沙尘铁不仅可以通过吸收光辐射，强化高原的“热泵”效应，还可能混合亚洲地表污染物，经盛行西风或冬季风加速传输至平流层，沉降到北太平洋甚至更远的地区[6]。青藏高原沙尘气溶胶的外部输入主要来自东亚沙源(古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠等)与南亚沙源(塔尔沙漠)，占青藏高原沙尘气溶胶总量超过 80% [7]。青藏高原内部的典型释放源区主要集中在青藏高原西北部、藏北高原南部、柴达木盆地藏南地区的雅鲁藏布江及其支流河谷等[8]。

沙尘铁在大气和海洋中的溶解度受矿物气溶胶颗粒的重力-粒径分异[9]、表面积与体积比[10]，及粗颗粒在海洋中停留时间等因素影响[11]，同时，Journet 等[12]发现铁的溶解度似乎与气溶胶的矿物学组

成密切相关。当前，对沙尘铁与粒径相关的矿物组成，还缺乏有效的实地测量和实验室量化手段。本研究借助自动化的单颗粒微分析系统，获得青藏高原典型源区模拟释放沙尘每样品超过 8000 个单颗粒的尺寸、质量、形貌和元素组成基础数据，建立沙尘铁单颗粒的粒度分布和矿物组成的统计关联，该定量结果的应用将可有效降低沙尘铁相关模式研究的不确定性。

2. 研究方法

2.1. 样品采集

青藏高原地处亚洲中南部，地理位置介于北纬 26°00′至 39°47′、东经 73°19′至 104°47′之间，面积约 2.5 Mkm²。区域年平均降水量约为 472.1 mm，平均海拔在 4000 m 以上，沙漠化土地总面积为 313274.62 km² [13]。本研究于 2019 年与 2023 年的夏季，在青藏高原的三个典型沙尘源区采集典型地表沉积物样品 (图 1)。以塑料铲收集表层 0~5 cm 的土壤样品，自然风干后，室温下密封保存于塑料自封袋中。

借助沙尘释放模拟系统收集模拟释放沙尘颗粒，其原理基于跃移沙粒的撞击克服土壤表面沙粒聚集体的粘附力，向空气中溅射喷出沙粒形成气溶胶[14][15]。模拟释放沙尘制样时，选取典型地貌代表性表土(表 1)，将 50 g 土壤样品松散平铺在铝合金板上，叶片旋转速度设置为 500、800 和 1200 rpm 时各采集沙尘 20 s，分别对应等效摩阻风速为 0.30、0.38 和 0.54 m/s 时的实际沙尘释放过程[16]。沙尘粒子借助微流量气溶胶采样器收集至聚碳酸酯滤膜表面，采样流速为 5 L/min，采样时间为 1 min。

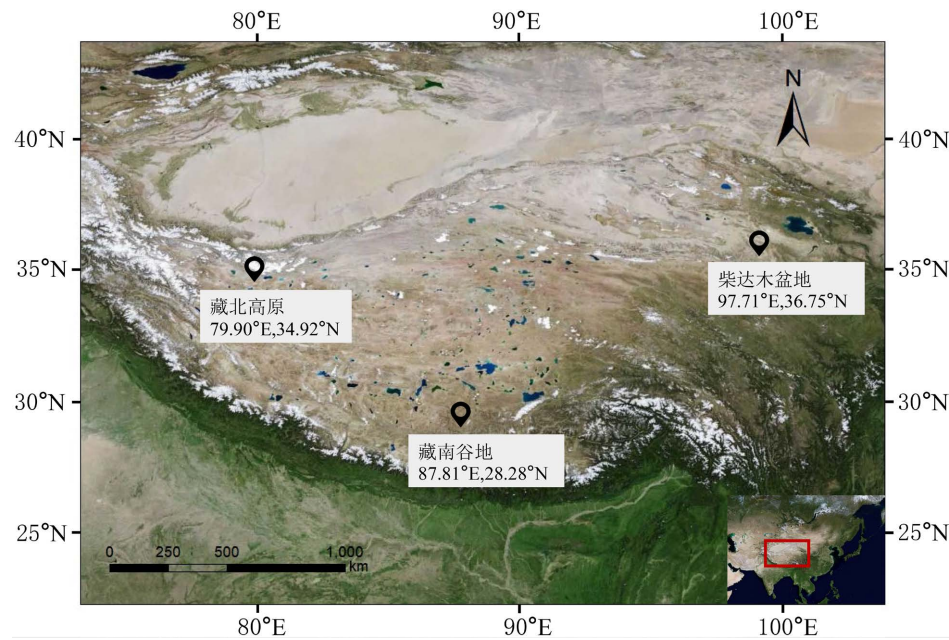


Figure 1. Locations of sampling sites on the Qinghai-Xizang Plateau (map from <https://www.tianditu.gov.cn/>)
图 1. 青藏高原采样点位置(地图来自 <https://www.tianditu.gov.cn/>)

Table 1. Information on sampling sites of surface dust and surface soils in typical landforms of the Qinghai-Xizang Plateau
表 1. 高原典型地貌地表沙尘采样点信息

采样点名称	经度(°E)	纬度(°N)	海拔(m)	典型地貌
藏北高原	79.9	34.92	4974	戈壁
柴达木盆地	97.71	36.75	2912.77	灌丛沙丘
藏南谷地	28.28	87.81	4186.7	山前戈壁

2.2. 沙尘单颗粒自动分析

从聚碳酸酯滤膜中心区域剪下矩形小片(约 $10 \times 10 \text{ mm}$), 并用碳导电胶带将其固定在样品钉上。借助 CCSEM 系统从聚碳酸酯膜的中心至边缘随机选取三个视野(每个视野面积均为 $100 \times 100 \mu\text{m}$)。对三个视野中的沙尘粒子逐一分析, 每个样品分析超过 8000 个单颗粒, 以获得粒径分布、形状因子、单颗粒形貌, 及元素组成的统计结果。

CCSEM 工作时采用二次电子(SE)分析模式, 加速电压为 20 kV, 工作距离为 8 mm, 对分析颗粒的大小、范围、扫描方式、选择分析区域以及灰度值的设置, 均需要根据具体样品进行人工设定。参数设置完成后, CCSEM 系统会自动执行查找、测量及分析颗粒物表面微观特征[17]。分析后得到粒子的粒径(D_p)为等效圆直径, 定义为颗粒的投影面积所对应的等效圆直径。粒子的长宽比(AR)是最长维度($d_{\max}$)与其最长垂直宽度($d_{\min}$)之比。粒子的圆度(R)是衡量粒子与圆形相似程度的指标, 其值在 0 到 1 之间, 其中规范圆形粒子的 R 为 1。圆度计算公式如下:

$$R = (4A) / \pi d_{\max}^2 \tag{1}$$

其中, A 是粒子的投影面积, 粒子的形状因子(FF)为粒子的面积与粒子的轮廓周长(p)之间的关系, FF 与 R 相似, 但对粒子轮廓粗糙度的变化更敏感, 公式如下:

$$FF = 4\pi A / p^2 \tag{2}$$

2.3. 矿物分类规则

借助扫描电子显微镜配备的能谱仪(EDX)对每个沙尘粒子的元素组成进行定量分析, 检测元素 Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Fe、Ti、C 和 O 的重量, 并根据其特征将 X 射线结果进行归一化, 元素 X 的相对质量含量为 $P(X) = X / (\text{Na} + \text{Mg} + \text{Al} + \text{Si} + \text{P} + \text{S} + \text{Cl} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Fe} + \text{Ti} + \text{C} + \text{O})$ 。将 Fe 元素质量分数小于 0.1 % 的颗粒物排除, 利用矿物经验分子式及其元素相对组成数据, 将所分析的沙尘铁粒子划入 6 个矿物类别。本研究使用的矿物分类规则列于表 2, 经验公式和元素组成信息可在 <http://minerals.gps.caltech.edu/> 的矿物学数据库中检索获得[17]。

Table 2. Classification rules of iron-containing mineral dusts in typical source regions on the Qinghai-Xizang Plateau
表 2. 青藏高原典型源区沙尘铁矿物分类规则

矿物类别	按 EDX wt%划分的分类规则	经验分子式
石膏	$S > 0.5$ and $\text{Ca} > 0.5$ and $\text{Na} < 0.5$ and $S > \text{Cl}$	CaSO_4
绿泥石	$\text{Al} + \text{Si} + \text{O} + \text{Mg} + \text{Fe} > 99.0$ and $\text{Al} > 0.5$ and $\text{Si} > 0.5$ and ($\text{Mg} > 0.5$ or $\text{Fe} > 0.5$)	$\text{Y}_3 [\text{Z}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot \text{Y}_3 (\text{OH})_6$, Y 主要代表 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+}
伊利石	$\text{Al} + \text{Si} + \text{O} + \text{K} + \text{Mg} + \text{Fe} > 99.0$ and $\text{Al} > 0.5$ and $\text{Si} > 0.5$ and $\text{K} > 0.5$ and ($\text{Mg} > 0.5$ or $\text{Fe} > 0.5$)	$\text{K} < 1 (\text{Al}, \text{R}^{2+})_2 [(\text{Si}, \text{Al}) \text{Si}_3\text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
蛭石	$\text{Al} + \text{Si} + \text{O} + \text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ca} > 99.0$ and ($\text{Mg} > 0.5$ or $\text{Ca} > 0.5$) and ($\text{Mg} > 0.5$ or $\text{Fe} > 0.5$ or $\text{Al} > 0.5$) and ($\text{Al} > 0.5$ or $\text{Si} > 0.5$) and $4 > \text{Si}/\text{Al}$	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
其他含铁矿物	$\text{Fe} > 0.5$ and $\text{Ti} < 0.5$	Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 FeCO_3 、 $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$ 等
其他铁钛化物	$\text{Ti} + \text{Fe} > 0.5$ and $\text{Fe} > 0.5$ and $\text{Ti} > 0.5$	FeTiO_x

3. 结果

3.1. 粒径分布与微观形貌

青藏高原含铁沙尘单颗粒的微观形貌特征如图 2 所示, 颗粒的粒径(D_p)介于 $0.2 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 之间, 最大

峰值粒径为 $0.7\ \mu\text{m}$ 。在藏北高原区、柴达木盆地和藏南谷地, 峰值粒径颗粒分别占总颗粒数的 22.50%、21.76%和 24.60%。大多数含铁沙尘颗粒的长宽比(AR)集中于 1~2 之间, 最大长宽比峰值在 1.2 处; 含铁沙尘颗粒的圆度值(R)介于 0.2~0.8 之间, 峰值在 0.6 处; 含铁沙尘粒子粗糙程度(FF)峰值在 0.35 处。戈壁地区的沙尘铁颗粒微观形貌呈现相似的趋势, 沙丘样品中的沙尘铁颗粒呈现出较小的粒径、更为圆润和光滑的特征。沙尘铁颗粒的粒径普遍大于沙尘颗粒, 而两者长宽比、圆度和粗糙度的趋势基本呈一致性。

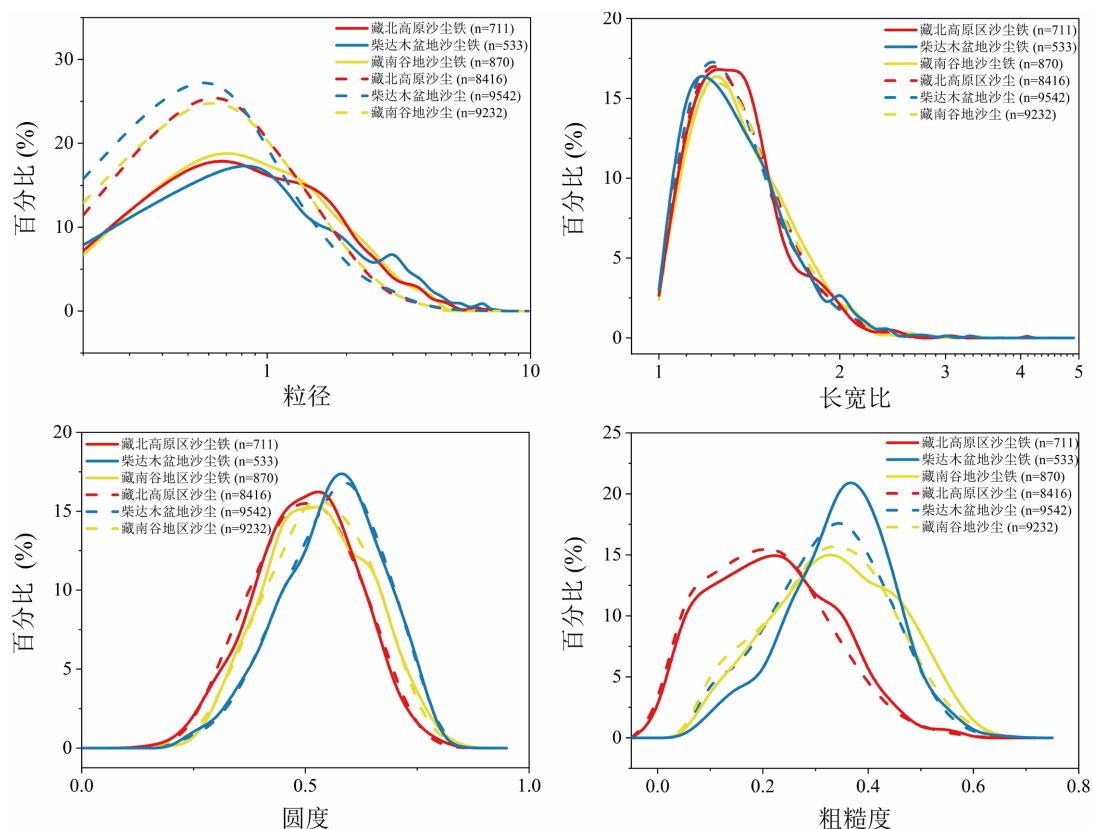


Figure 2. Distribution characteristics of typical surface iron-bearing dust and dust quantity with particle size D_p (μm), aspect ratio AR , form factor FF and roundness R over the Qinghai-Xizang Plateau (the number in parentheses is the number of measured particles)

图 2. 青藏高原典型地表含铁沙尘粒径(μm)、长宽比、圆度和粗糙度形状因子的数量分布特征(括号内数字为受测粒子数量)

3.2. 含铁沙尘矿物类别

青藏高原含铁沙尘单颗粒矿物组成在不同粒度范围内的差异如图 3。在 $0.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 范围内, 不同粒径段含铁沙尘颗粒具有相似的矿物组成特征, 这些矿物主要包括绿泥石、伊利石、蛭石、石膏、其它含铁矿物和含钛-铁矿物。沙尘铁颗粒主要以粘土矿物的形式存在, 绿泥石、伊利石和蛭石是最常见的三种矿物, 占沙尘铁矿物总数的 80.3%~84.1%。在亚微米尺寸($<1.0\ \mu\text{m}$)范围内, 样品矿物占总颗粒数的 24.6%~27.6%, 主要由绿泥石和其他含铁矿物构成。当粒径范围在 $1.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 之间时, 绿泥石颗粒的相对比例有所下降, 而伊利石颗粒的相对比例则相应增加。此外, 戈壁土壤中的绿泥石和伊利石含量较沙丘样品中的含量更为丰富。其中, 沙丘地貌样品中绿泥石占沙尘铁矿物总数的 55.6%, 伊利石占沙尘铁矿物总数的 17.26% (图 3(a); 图 3(c))。而戈壁地貌中绿泥石占沙尘铁矿物总数的 $51.5\% \pm 1.1\%$, 伊利石占沙尘铁矿物总数的 $14.7\% \pm 5.2\%$ (图 3(b))。

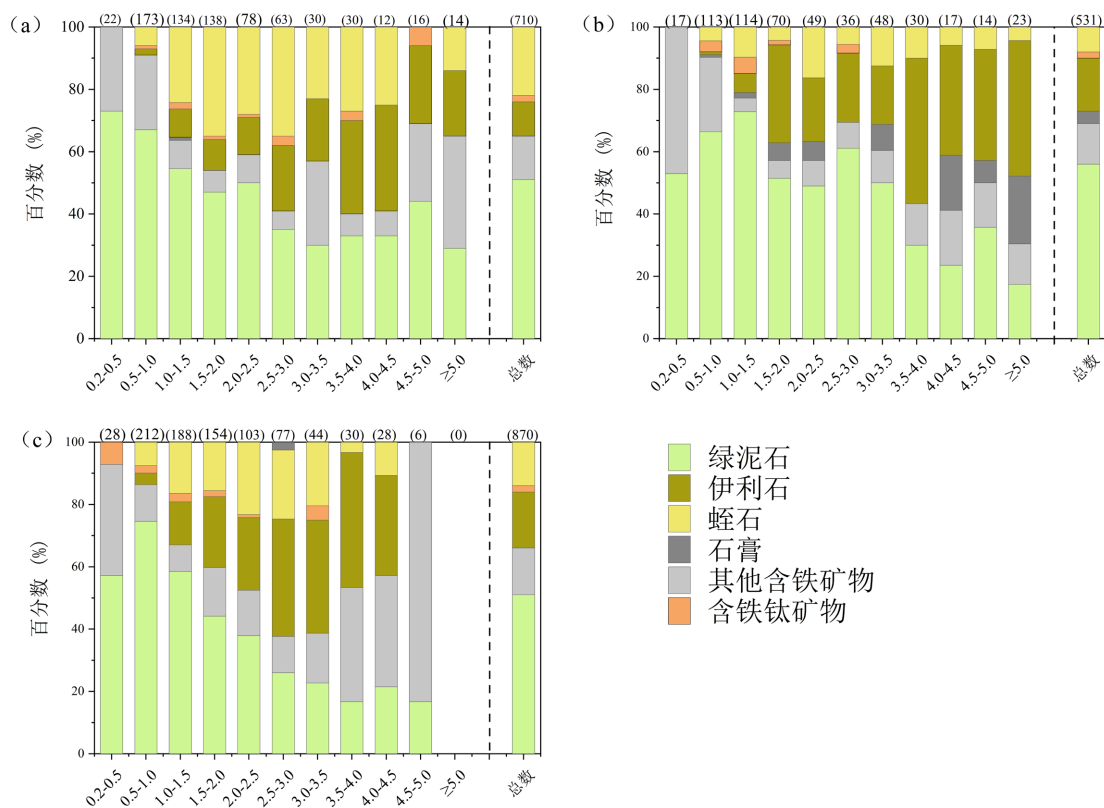


Figure 3. The relative percentage of mineral composition of iron-bearing dust particles in different particle size ranges: (a) is the Northern Tibet Plateau; (b) is the Qaidam Basin, and (c) is the southern Tibet Valley; The number at the top of each particle size column is the number of particles analyzed in that particle size

图 3. 含铁沙尘单颗粒的矿物组成在不同粒度范围内的相对百分比：(a) 藏北高原；(b) 柴达木盆地；(c) 藏南谷地；各粒径柱顶端的数字为该粒径段内分析的颗粒数量

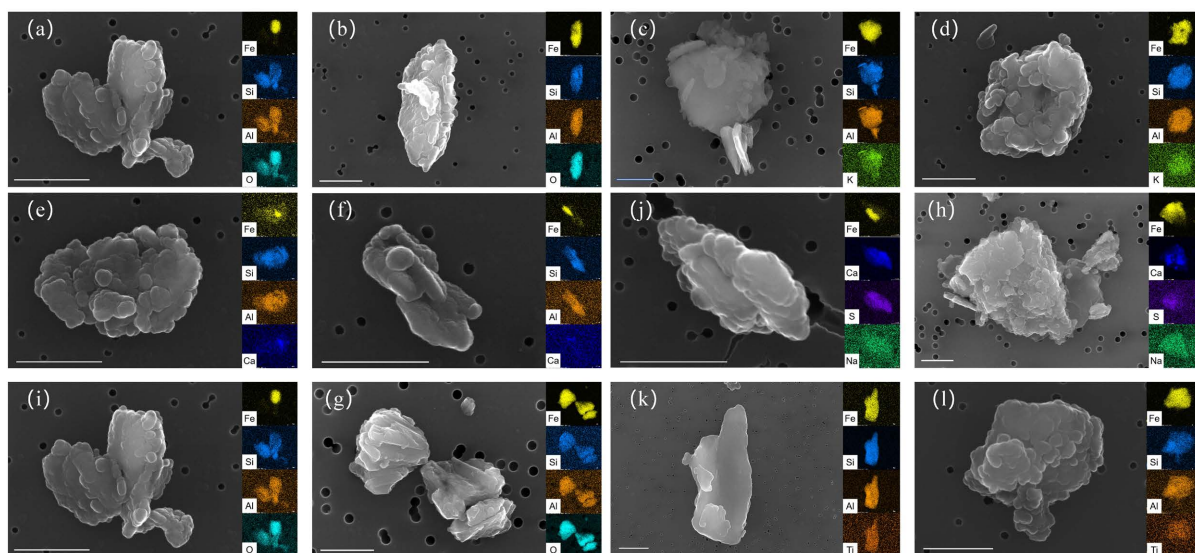


Figure 4. Composition of iron-containing dust particles and their elemental distributions: (a-b) is chlorite-bearing; (c-d) is illite-bearing; (e-f) is vermiculite-bearing; (g-h) is iron containing gypsum; (i-j) is other iron-bearing minerals; (k-l) is other iron-titanium compounds; Scale is 1 μm

图 4. 沙尘铁颗粒的元素分布：(a-b)为含铁绿泥石；(c-d)为含铁伊利石；(e-f)为含铁蛭石；(g-h)为含铁石膏；(i-j)为其他含铁矿物；(k-l)为其他铁钛化合物；比例尺为 1 μm

共 2114 个沙尘铁颗粒的元素分布显示，组成沙尘铁颗粒的矿物大多数呈现外部混合状态(即沙尘铁颗粒组成元素独立分布于轮廓独立的各粒子部分中)，只有少数颗粒为内部混合状态(即沙尘铁颗粒混合状态均匀，所有粒子的轮廓范围内每个组成元素都均匀分布)。图 4 为手动分析检视记录的高原沙尘铁矿物高清图像和化学组成。元素分布显示，青藏高原沙尘铁颗粒中主要共存元素包括不同质量含量的铝(Al)、硅(Si)和氧(O)，而次要元素则包括镁(Mg)、钙(Ca)、钛(Ti)和钾(K)等，沙尘铁颗粒与硅铝酸盐混合并存在于颗粒表面。

3.3. 不同粒径下沙尘铁数量与质量的关系

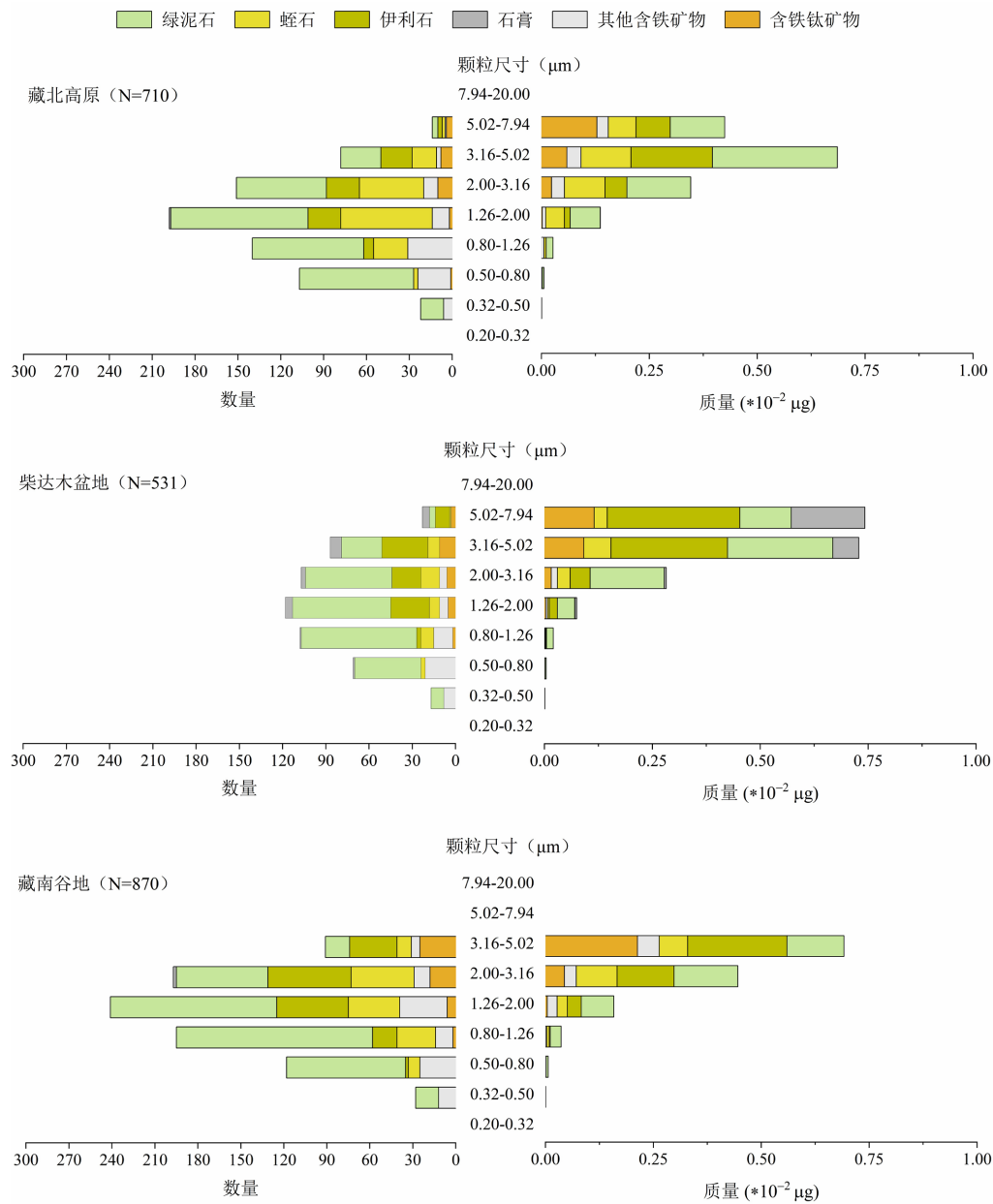


Figure 5. Comparison of size-resolved amount and mass of iron-bearing mineral dust particles in different regions on the Plateau (Quantity unit: piece; Mass unit: $10^{-2} \mu\text{g}$)

图 5. 高原不同区域含铁沙尘单颗粒矿物在不同粒度范围内的数量 - 质量对比(数量单位: 个; 质量单位: $10^{-2} \mu\text{g}$)

图 5 为青藏高原三个区域不同粒径范围下沙尘铁质量和数量的变化特征。沙丘和戈壁地貌沙尘铁的数量富集于细粒子部分(粒径范围 0.8~5.0 μm)，占颗粒总数的 76.5%~84.1%，其粒径峰值范围为 1.3~2.0 μm ；沙丘、戈壁地貌沙尘铁的质量富集于较粗粒子部分(粒径范围 2.0~7.9 μm)，占颗粒总质量的 85.0%~94.6%，其粒径峰值范围分别为 5.0~7.9 μm 和 3.1~5.0 μm 。此外，戈壁地貌下沙尘铁数量大约是沙丘地貌的两倍，质量无明显差异。

4. 讨论

4.1. 计算机控制扫描电子显微镜的分析优势

对沙尘铁的全样分析和单颗粒分析方法均已被广泛使用，可分别从整体和微观尺度(微米至亚微米范围)理解沙尘铁的来源、传输、演化过程，及其环境效应。Nowak 等人[18]利用 X 射线衍射(XRD)量化低质量气溶胶粒子样品的矿物学组成，但无法识别和分析单个粒子尺度的矿物类型。时宗波等人[19]利用扫描电子显微镜-能量色散 X 射线光谱仪(SEM-EDX)和透射电子显微镜-能量色散 X 射线光谱仪(TEM-EDX)，观测了云物理反应过程前后亚微米级别和纳米级别的沙尘铁颗粒聚集物中的新生成物质。传统 SEM-EDX 无法获取小于 100 nm 的颗粒，而 TEM-EDX 仅限于研究对电子束足够透明的亚微米颗粒[20]。单颗粒分析手段除了能够提供高分辨率的图像，直观地展示沙尘铁颗粒的形态和结构外，还能够精确获取元素分布及含量，并推断颗粒物的矿物组成。通过对微米和亚微米级别颗粒的分析，弥补了传统全样方法在颗粒微观尺度上分析能力的不足然而，既往的单颗粒分析方法均基于耗时费力、依赖操作者经验的手动分析，受测粒子的数量多为数百个，难以有效建立定量化的沙尘铁粒径与矿物组成的统计关联。而 CCSEM 同时克服了传统手动方法的随机分析瓶颈，可同步快速自动化获取大量(每样品数千个)颗粒物的微观理化信息，为沙尘铁的来源和环境效应研究提供更准确、高效的基础数据。

4.2. 文献比较沙尘铁浓度水平

Table 3. Average iron concentrations of dust iron particles in the fine ($D_p < 2.5 \mu\text{m}$) and the coarse ($D_p > 2.5 \mu\text{m}$) in the Asian source region of the Qinghai-Xizang Plateau (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

表 3. 青藏高原亚洲源区沙尘铁细颗粒($D_p < 2.5 \mu\text{m}$)和粗颗粒($D_p > 2.5 \mu\text{m}$)的平均铁浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

采样点	$D_p < 2.5 \mu\text{m}$	$D_p > 2.5 \mu\text{m}$	TSP	参考文献
藏北高原	9.6	34.3	43.9	本研究
柴达木盆地	6.5	48.6	55.1	本研究
藏南谷地	48.3	77.3	125.7	本研究
渤海	0.5	-	-	[23]
黄海	1.1	1.8	2.4	[24]
东海	1.6	2.8	3.8	[24]
南海	0.05	-	0.4	[25] [26]
太平洋	0.07	0.06	-	[27]
西北太平洋	0.07	-	0.2	[28] [29]
撒哈拉	-	-	92,000	[31]
大西洋	0.3	0.1	-	[27]
大西洋	0.1	0.1	-	[27]

沙尘经大气传输后沉降到达陆地，并在大气环流的驱动下向海洋运输，为海洋生态系统输送关键的

营养成分[21]。本研究进一步补充沙尘铁颗粒中铁元素质量浓度相关实测数据见表3, 结果显示, 在青藏高原地区, 粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 沙尘样本中, 铁元素平均质量浓度达到 $21.5 \pm 23.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而粒径大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的沙尘, 铁元素平均质量浓度为 $53.4 \pm 21.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$; 青藏高原地区沙尘铁总悬浮颗粒物(TSP)浓度平均质量浓度为 $74.9 \pm 44.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, 而撒哈拉地区沙尘铁 TSP 平均质量浓度约 $92,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

对比表3发现, 青藏高原地区沙尘中铁元素浓度远高于中国近海区域[22]-[24]及太平洋地区[25]-[29], 其中藏南谷地铁浓度水平最高; 与青藏高原沙尘源区对比, 撒哈拉地区含量呈现显著极高的水平, 在东北环流的作用下向大西洋地区长距离运输, 沙尘中铁元素质量显著降低[27]。不同区域沙尘铁浓度差异是铁元素在全球范围内生物地球化学循环的体现, 反映出沙尘传输受距离远近的影响, 铁浓度的区域差异有助于研究沙尘在大气中的传输路径和扩散规律, 结合本研究中图5分析可知: 细粒子质量相对较小, 这一特性与粗颗粒的沉降差异共同影响, 导致青藏高原地区沙尘铁浓度远超海洋上空, 且距离沙尘源区较远的海域细颗粒中的铁占比逐渐增加[27]; 撒哈拉和青藏高原地区作为重要的沙尘源, 地表沙尘铁含量丰富, 这主要与沙尘源地独特的地质条件[29][30]、排放源活跃程度以及气象传输条件密切相关[31]。

4.3. 沙尘铁单颗粒微观表征的环境意义

沙尘铁粒子的微观形貌、元素组成以及质量数量的分布特征, 对判断其来源和演化具有指示作用。在风蚀作用下, 含铁沙尘主要集中在较大的沙尘颗粒中, 且与戈壁源相比, 沙丘源的沙尘铁颗粒存在微观形貌差异, 多呈现较大的粒径, 且更为圆润、光滑。这些沙尘铁颗粒在质量分布上主要集中于较大颗粒, 而在数量分布上则主要集中于较小颗粒。这些差异可直观反映沙尘源区的风化程度与地质作用[32], 同时, 含铁沙尘可作为吸附剂和催化剂, 与周围的沙尘颗粒发生物理化学反应[33]。大气环流的作用使沙尘颗粒的扩散和混合更为充分, 含铁沙尘与其他成分发生二次混合, 可形成具有特殊稳定性和光学性质的气溶胶团聚体[34]。Smalley 等人[35]在中国黄土矿床检测到常见的含铁硅酸盐矿物包括绿泥石、伊利石, 并认为沙漠地区是黄土高原的主要物质来源区。Marcotte 等人[36]将伊利石、高岭石、磁铁矿、赤铁矿和针铁矿作为撒哈拉沙尘铁存在的主要矿物形式。黄土高原、撒哈拉沙漠与本研究青藏高原沙尘铁矿物组成的相似性和差异性, 均可视为物源和地质演化长期共同作用的结果。

5. 结论

本研究借助 CCSEM 获得青藏高原地表风蚀释放的沙尘铁微观理化特征。高原沙尘铁的粒径分布及形貌参数呈现出明显的地域差异, 含铁沙尘粒子粒径富集于 $0.7\sim 1.0\ \mu\text{m}$, 最大长宽比富集于 $1.2\sim 1.4$ 处, 圆度值富集于 $0.55\sim 0.6$ 之间, 粗糙程度富集在 $0.25\sim 0.4$; 绿泥石、伊利石和蛭石构成了高原含铁沙尘粒子的主要矿物类型, 占沙尘铁颗粒总数的 $80.3\%\sim 84.1\%$; 高原沙尘铁的数量富集于 $3.2\sim 7.9\ \mu\text{m}$, 高原沙尘铁的质量富集于 $1.3\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 。尽管样本量不足, 但本研究借助计算机控制扫描电子显微镜获得的青藏高原沙尘铁单颗粒的粒径分布、形貌特征和矿物组成等定量化数据, 不但可以作为高原沙尘释放通量和微观理化源清单的探索性实例, 还可用于评估沙尘气溶胶对辐射收支平衡、生物地球化学循环的影响。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(42030511)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40030201)共同资助。

参考文献

- [1] Che, H., Xia, X., Zhao, H., Li, L., Gui, K., Zheng, Y., et al. (2024) Aerosol Optical and Radiative Properties and Their Environmental Effects in China: A Review. *Earth-Science Reviews*, **248**, Article 104634.

- <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104634>
- [2] Kenlee, B., Owens, J.D., Raiswell, R., Poulton, S.W., Severmann, S., Sadler, P.M., *et al.* (2024) Long-Range Transport of Dust Enhances Oceanic Iron Bioavailability. *Frontiers in Marine Science*, **11**, Article 1428621. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1428621>
 - [3] Harrison, S.P., Kohfeld, K.E., Roelandt, C. and Claquin, T. (2001) The Role of Dust in Climate Changes Today, at the Last Glacial Maximum and in the Future. *Earth-Science Reviews*, **54**, 43-80. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(01)00041-1)
 - [4] Zhang, X.Y., Arimoto, R. and An, Z.S. (1997) Dust Emission from Chinese Desert Sources Linked to Variations in Atmospheric Circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **102**, 28041-28047. <https://doi.org/10.1029/97jd02300>
 - [5] 刘宁, 韩永翔, 汤耀国, 等. 基于 WRF/chem 模式的 1961~2015 年青藏高原逐日起沙量及对东亚沙尘气溶胶的贡献模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 166-171.
 - [6] Zhang, T., Zheng, M., Sun, X., Chen, H., Wang, Y., Fan, X., *et al.* (2023) Environmental Impacts of Three Asian Dust Events in the Northern China and the Northwestern Pacific in Spring 2021. *Science of the Total Environment*, **859**, Article 160230. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160230>
 - [7] 曹佳慧, 陈思宇, 张潮, 等. 青藏高原沙尘的外源贡献[J]. 中国沙漠, 2024, 44(2): 57-65.
 - [8] 金炯, 董光荣, 邵立业, 等. 西藏土地风沙化问题的研究[J]. 地理研究, 1994, 13(1): 60-69.
 - [9] Buck, C.S., Landing, W.M. and Resing, J.A. (2010) Particle Size and Aerosol Iron Solubility: A High-Resolution Analysis of Atlantic Aerosols. *Marine Chemistry*, **120**, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.11.002>
 - [10] Baker, A.R. and Jickells, T.D. (2006) Mineral Particle Size as a Control on Aerosol Iron Solubility. *Geophysical Research Letters*, **33**, L17608. <https://doi.org/10.1029/2006gl026557>
 - [11] Hsieh, C., Chen, H. and Ho, T. (2022) The Effect of Aerosol Size on Fe Solubility and Deposition Flux: A Case Study in the East China Sea. *Marine Chemistry*, **241**, Article 104106. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2022.104106>
 - [12] Journet, E., Desboeufs, K.V., Caquineau, S. and Colin, J. (2008) Mineralogy as a Critical Factor of Dust Iron Solubility. *Geophysical Research Letters*, **35**, L07805. <https://doi.org/10.1029/2007gl031589>
 - [13] 李森, 董玉祥, 董光荣, 等. 青藏高原土地沙漠化区划[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 103-112.
 - [14] Wu, F., Song, N., Hu, T., Ho, S.S.H., Cao, J. and Zhang, D. (2023) Surrogate Atmospheric Dust Particles Generated from Dune Soils in Laboratory: Comparison with Field Measurement. *Particology*, **72**, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.02.007>
 - [15] Wu, F., Cheng, Y., Hu, T., Song, N., Zhang, F., Shi, Z., *et al.* (2022) Saltation-Sandblasting Processes Driving Enrichment of Water-Soluble Salts in Mineral Dust. *Environmental Science & Technology Letters*, **9**, 921-928. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00652>
 - [16] Etyemezian, V., Nikolich, G., Ahonen, S., Pitchford, M., Sweeney, M., Purcell, R., *et al.* (2007) The Portable in Situ Wind Erosion Laboratory (PI-SWEL): A New Method to Measure PM10 Windblown Dust Properties and Potential for Emissions. *Atmospheric Environment*, **41**, 3789-3796. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.018>
 - [17] Hu, T., Wu, F., Song, Y., Liu, S., Duan, J., Zhu, Y., *et al.* (2022) Morphology and Mineralogical Composition of Sandblasting Dust Particles from the Taklimakan Desert. *Science of the Total Environment*, **834**, Article 155315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155315>
 - [18] Nowak, S., Lafon, S., Caquineau, S., Journet, E. and Laurent, B. (2018) Quantitative Study of the Mineralogical Composition of Mineral Dust Aerosols by X-Ray Diffraction. *Talanta*, **186**, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.03.059>
 - [19] Shi, Z., Krom, M.D., Jickells, T.D., Bonneville, S., Carslaw, K.S., Mihalopoulos, N., *et al.* (2012) Impacts on Iron Solubility in the Mineral Dust by Processes in the Source Region and the Atmosphere: A Review. *Aeolian Research*, **5**, 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.03.001>
 - [20] Inkson, B.J. (2016) Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization. In: Hübschen, G., Altpeter, I., Tschuncky, R. and Herrmann, H.-G., Eds., *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Elsevier, 17-43. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100040-3.00002-x>
 - [21] Maki, T., Lee, K.C., Pointing, S.B., Watanabe, K., Aoki, K., Archer, S.D.J., *et al.* (2021) Desert and Anthropogenic Mixing Dust Deposition Influences Microbial Communities in Surface Waters of the Western Pacific Ocean. *Science of the Total Environment*, **791**, Article 148026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148026>
 - [22] 张帆, 陈颖军, 王晓平, 等. 砒矾岛国家大气背景站 PM_{2.5} 化学组成及季节变化特征[J]. 2014, 43(4): 317-328.
 - [23] Zhao, R., Han, B., Lu, B., Zhang, N., Zhu, L. and Bai, Z. (2015) Element Composition and Source Apportionment of

- Atmospheric Aerosols over the China Sea. *Atmospheric Pollution Research*, **6**, 191-201. <https://doi.org/10.5094/apr.2015.023>
- [24] Zhang, X., Zhuang, G., Guo, J., Yin, K. and Zhang, P. (2007) Characterization of Aerosol over the Northern South China Sea during Two Cruises in 2003. *Atmospheric Environment*, **41**, 7821-7836. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.06.031>
- [25] 杨一超, 薛金林, 任景玲, 等. 夏季南海气溶胶微量元素浓度, 溶解度及干沉降通量[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2365-2374.
- [26] Hand, J.L., Mahowald, N.M., Chen, Y., Siefert, R.L., Luo, C., Subramaniam, A., *et al.* (2004) Estimates of Atmospheric-processed Soluble Iron from Observations and a Global Mineral Aerosol Model: Biogeochemical Implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**, D17205. <https://doi.org/10.1029/2004jd004574>
- [27] 张天乐, 郑玫. 中国近海及西北太平洋气溶胶铁的研究进展[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 602-619.
- [28] Shi, Z.B., Woodhouse, M.T., Carslaw, K.S., Krom, M.D., Mann, G.W., Baker, A.R., *et al.* (2011) Minor Effect of Physical Size Sorting on Iron Solubility of Transported Mineral Dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 8459-8469. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8459-2011>
- [29] Shi, Z., Krom, M.D., Bonneville, S., Baker, A.R., Bristow, C., Drake, N., *et al.* (2011) Influence of Chemical Weathering and Aging of Iron Oxides on the Potential Iron Solubility of Saharan Dust during Simulated Atmospheric Processing. *Global Biogeochemical Cycles*, **25**, GB2010. <https://doi.org/10.1029/2010gb003837>
- [30] Baldo, C., Formenti, P., Nowak, S., Chevaillier, S., Cazaunau, M., Pangui, E., *et al.* (2020) Distinct Chemical and Mineralogical Composition of Icelandic Dust Compared to Northern African and Asian Dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 13521-13539. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13521-2020>
- [31] Knippertz, P. and Todd, M.C. (2012) Mineral Dust Aerosols over the Sahara: Meteorological Controls on Emission and Transport and Implications for Modeling. *Reviews of Geophysics*, **50**, RG1007. <https://doi.org/10.1029/2011rg000362>
- [32] Zhao, C., Yang, Y., Fan, H., Huang, J., Fu, Y., Zhang, X., *et al.* (2019) Aerosol Characteristics and Impacts on Weather and Climate over the Tibetan Plateau. *National Science Review*, **7**, 492-495. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz184>
- [33] Martin, L.R. and Good, T.W. (1991) Catalyzed Oxidation of Sulfur Dioxide in Solution: The Iron-Manganese Synergism. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **25**, 2395-2399. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90113-1](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90113-1)
- [34] Deboudt, K., Flament, P., Choël, M., Gloter, A., Sobanska, S. and Colliex, C. (2010) Mixing State of Aerosols and Direct Observation of Carbonaceous and Marine Coatings on African Dust by Individual Particle Analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115**, D24207. <https://doi.org/10.1029/2010jd013921>
- [35] Smalley, I.J. (2006) Liu Tungsheng 1988: Loess in China (Second Edition). Beijing: China Ocean Press, Berlin: Springer-Verlag, 224 pp. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **30**, 673-676. <https://doi.org/10.1177/0309133306071148>
- [36] Marcotte, A.R., Anbar, A.D., Majestic, B.J. and Herckes, P. (2020) Mineral Dust and Iron Solubility: Effects of Composition, Particle Size, and Surface Area. *Atmosphere*, **11**, Article 533. <https://doi.org/10.3390/atmos11050533>