

Preliminary Research on the Relation among Surface Deposits of the Main Desert in China Based on Constant Elements

Cuiping Guo¹, Hao Guo², Zhiming Xin³

¹Forestry Station of Taiji Town of Beipiao County, Beipiao Liaoning

²Desertification Research Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing

³Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou Inner Mongolia

Email: guohaomail@163.com

Received: Dec. 8th, 2017; accepted: Dec. 22nd, 2017; published: Dec. 29th, 2017

Abstract

To understand the relation among China's major deserts, sampling in the Chinese major desert rejoins including Mu Us sand landy, Hobq desert, Ulan Buh desert, Tengger desert, Badain Jaran desert, Taklimakan desert and Qaidam desert, a total of 49 samples were obtained and the constant elements (including Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Si) were analyzed. The result shows that the maximum coefficients of variation of total elements are Mg and Ca. The weathering characteristics analysis showed that the above regions are in the primary stage of weathering that losing Ca, Na. According to the degree of weathering the above regions can be divided into three regions: 1) Mu Us sand landy. 2) Qaidam desert and Taklimakan desert. 3) Hobq desert, Ulan Buh desert, Tengger desert, Badain Jaran desert. Major element characteristics of Luochuan loess are very close to Taklimakan desert and Qaidam desert, and different from other regions. The result proved that dust from the Loess Plateau comes from the Taklimakan desert and Qaidam desert.

Keywords

Duststorm Source Regions, Constant Element, Weathering, Relation

基于常量元素的沙漠(沙地)地表沉积物的关系初步研究

郭翠萍¹, 郭浩², 辛智鸣³

¹北票市台吉林果服务站, 辽宁 北票

²中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京

³中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口
Email: guohaomail@163.com

收稿日期: 2017年12月8日; 录用日期: 2017年12月22日; 发布日期: 2017年12月29日

摘要

为了解中国主要沙漠地表沉积物之间的关系, 分别在毛乌素沙地、库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、塔克拉玛干沙漠和柴达木沙漠取样, 分析了7种常量元素(Na、K、Ca、Mg、Al、Fe、Si)含量。分析结果表明: 七大沙漠(沙地)地表沉积物的Mg和Ca含量有较大差异; 其地表物质都处于风化初级的脱Ca、Na阶段。按风化程度可划分为三个区域: 1) 毛乌素沙地。2) 柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠。3) 库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠; 洛川黄土的常量元素组成与塔克拉玛干沙漠和柴达木沙漠十分接近, 证明黄土高原降尘来自塔克拉玛干沙漠和柴达木沙漠。

关键词

沙尘暴源区, 常量元素, 风化, 关系

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

沙尘暴溯源的研究是沙尘暴监测和灾害管理基础研究的重点, 通过研究不仅能够了解过去和现在的全球气候系统运行规律[1], 而且可为预防沙尘暴和改善环境提供建议和方法。在自然条件下, 沙尘源区表面物质的组成取决于下垫面, 特别是母质的情况[2] [3] [4], 在地质发育过程中, 沙尘源区表面物质虽然都会受到风化和包括生物破损、盐碱化、物理破损等破损过程的影响[5], 然而在一定范围内地区风化特征还是相似的[6], 但在大范围区域会存在差异。所以不同的地区往往会有特定的矿物组合[7], 不同地壳的特征会形成不同的元素特征[8] [9]。沙尘暴源区元素特征的探讨有同位素[10]、微量元素[6] [11]以及矿物组合[12] [13] [14]等方法但常量元素分析方法则更加的方便和实惠。

我国的北方和西部是世界上重要的沙尘物源地[15] [16], 通过三大传输路线[17], 沙尘传送到我国的华北, 往往会造成严重的环境事件, 甚至在我国东边日本和北太平洋和西边的格陵兰岛的降尘也被证明来自中国[16] [18] [19]。目前, 虽然有学者[7] [18] [19]在沙尘源区的地质特征、地质演化上有所探讨, 但采样难度大、典型性不强的问题还十分严重, 难以反应我国沙尘源区常量元素特征真实情况。为此, 本文在我国主要沙漠(沙地)广泛的采集表层样品, 进行常量元素分析, 以此探讨我国主要沙漠的(沙地)地质特点及其相互关系, 掌握各源区表面元素特征和风化演化特点, 为沙尘溯源和沙尘监测以及了解古气候变化和大气循环提供理论依据。

2. 采样及其实验方法

2.1. 采样

按我国沙尘暴源区分布情况分别在我国西部毛乌素沙地(Mu)、库布其沙漠(Kq)、乌兰布和沙漠(Ul)、

腾格里沙漠(Tg)、巴丹吉林沙漠(Bd)、塔克拉玛干沙漠(Tk)、柴达木沙漠(Cd)的流动沙丘或沙岗迎风面无植被区域上部采样。采样地点为远离公路、农田等人类干扰严重区域。采样地点见图 1、采样信息见表 1。

2.2. 实验方法

2.2.1. 常量元素的实验方法

准确称取沙样(过 100 目) 0.5 g 于 50 ml 聚四氟乙烯烧杯中, 加入 10.0 ml HClO_4 和 10.0 ml HF, 轻轻摇动, 混合均匀过夜。第二天在通风柜内用可条电热板控温加热消化, 以不沸腾为准, 直至冒白烟为止。冷却后, 再加入 5.0 ml HF, 继续消化, 直至冒白烟并蒸发近干。冷却后, 加入 4 ml 2 mol/L HCl 溶液, 加热溶解残渣, 用超纯水定容于 50 ml 容量瓶中, 摇均后用干滤纸过滤在 10 ml 塑料管中, 然后用美国 Thermo 公司的 IRIS Intrepid II XSP 等离子发射光谱仪进行试验。测量的元素有 Al、Fe、Ca、Na、K 和 Mg。

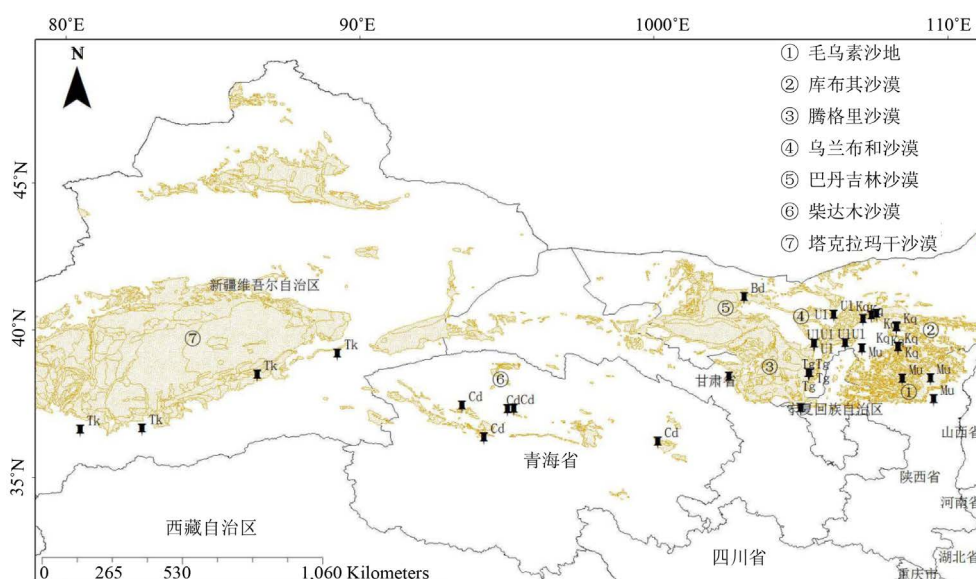


Figure 1. Distribution of Sampling point

图 1. 采样地点分布图

Table 1. Sample information

表 1. 采样点信息

区域	采样范围				个数(n)
	东经(E)		北纬(N)		
毛乌素沙地	107°09'21.32"	109°53'19.7"	37°58'39.5"	39°44'5.6"	12
库布其沙漠	107°12'13.95"	108°31'54.56"	39°34'11.75"	40°48'43.45"	8
乌兰布和沙漠	105°45'29.21"	106°51'14.55"	39°46'16.99"	40°45'21.3"	8
腾格里沙漠	102°55'21.2"	105°29'59.56"	37°28'29"	38°47'20.25"	9
巴丹吉林沙漠	103°8'9.8"	104°43'34"	40°23'30"	41°5'33.8"	3
塔克拉玛干沙漠	80°47'36.2"	89°23'38"	36°55'26.7"	39°12'18.5"	4
柴达木沙漠	93°46'50.4"	100°14'29.1"	36°14'0.74"	37°37'23.2"	5

2.2.2. Si 元素的实验方法

Si 元素的测量则是根据 GB7873-87 使用容量法测量。过程为：称取 2 g NaOH 于坩埚高温使 NaOH 熔融，冷却加过 100 目筛子的样品，高温加热 10 min，冷却将样品转入塑料杯并加入 15 ml 浓硝酸，加入 3 g 氯化钾并加入 10 ml 15% 氟化钾溶液形成氟硅酸钾沉淀，沉淀 5 min，快速过滤，将沉淀物到入原塑料杯中，加入酚酞和氢氧化钠中和未沉淀的酸，最后将烧杯加入沸水至 200 ml，加入酚酞，并加入氢氧化钠使溶液至微红色，记下消耗的氢氧化钠体积，换算成二氧化硅含量。

3. 实验结果及其分析

3.1. 实验结果

Tongyan Lu [4]、Sonia Castallo [21] 等研究表明 Al、Na、Mg、Fe 含量不仅受制于母岩、风化程度，还会随着沙尘粒径的变小而含量增大[22]。所以本文选取对风化敏感的 Na、K、Ca、Mg 元素[23] [24] 和 风化中期和后期含量高的 Al 和 Si [25] 以及非造岩元素 Fe 作为测试元素。在样品消解前，均经过 100 目的筛子的筛选。按氧化物分析统计结果见表 2。

Table 2. Element content (单位: %)

表 2. 元素含量测定结果表

区域 元素		Mu	Kq	Ul	Tg	Bd	Tk	Cd	UCC	Ht	PASS	Jc
	平均值	10.24	8.96	8.36	8.61	8.59	8.91	7.71				
Al ₂ O ₃	最大值	11.10	9.81	8.77	8.97	8.75	9.37	8.44	15.20	12.01	18.90	13.20
	最小值	9.03	8.40	7.09	7.99	8.34	8.37	7.08				
	平均值	2.19	3.29	3.31	2.15	3.96	6.27	5.47				
CaO	最大值	3.46	4.48	4.04	3.00	4.81	7.13	9.04	4.20	7.26	1.30	4.68
	最小值	1.47	1.98	2.42	1.46	2.75	5.48	4.03				
	平均值	2.81	2.89	2.57	2.77	3.19	2.57	2.03				
Fe ₂ O ₃	最大值	4.43	3.64	3.16	3.18	3.51	3.84	2.36	5.00	4.95	7.22	5.50
	最小值	1.38	2.28	2.10	2.49	3.02	2.37	1.55				
	平均值	2.15	1.73	1.74	1.89	1.67	1.71	1.53				
K ₂ O	最大值	2.43	1.87	1.95	2.07	1.70	1.94	1.70	3.40	2.12	3.70	2.54
	最小值	1.79	1.50	1.62	1.73	1.65	1.57	1.42				
	平均值	2.75	1.94	1.77	1.74	1.64	2.07	1.82				
Na ₂ O	最大值	3.16	2.19	1.89	1.98	1.68	2.18	2.06	3.90	1.45	1.20	1.45
	最小值	1.81	1.63	1.51	1.42	1.58	1.95	1.61				
	平均值	0.71	1.08	1.26	1.21	2.06	1.78	1.16				
MgO	最大值	1.14	1.29	1.59	1.26	2.41	2.00	1.87	2.20	2.05	2.20	2.94
	最小值	0.50	0.87	0.93	1.10	1.61	1.61	0.70				
	平均值	68.97	71.79	72.80	73.69	67.44	60.04	66.85				
SiO ₂	最大值	72.15	76.05	75.12	75.88	71.41	64.30	72.62	66.00	58.26	62.80	55.58
	最小值	62.45	67.24	69.83	70.94	64.54	54.76	51.65				

注: Ht (洛川黄土)数据参考文献[46], Jc (北京降尘)参考文献[47]。UCC 和 PASS 均参考文献[32]。

可以看出, 各个沙漠(沙地)的常量元素含量是不同的, Na 和 K 元素在不同的区域变化有相关性, 可能是由于其化学特相相似的缘故。同一种元素不同沙漠(沙地)也是有差异的, 这些差异来源于区域母岩、造岩的差异和区域风化程度的不同。

3.2. 结果分析与讨论

3.2.1. 常量元素含量

1) 变幅和变异系数

图 2 中变幅最大的是 SiO_2 , 其次是 CaO 。主要原因是 Si 元素是地壳中仅次于 O 的第二大元素, 在碎屑沉积物中砂岩和砾岩中含量高且有一定的变幅[25]。 CaO 在柴达木沙漠的变幅更为显著, 可能是风化程度、降雨等因素的不一所致。其余各个区域的氧化物变幅均比较小。

变幅是数据变化程度的衡量, 变异系数是对数据变异程度的体现。如图 3 所示, Al_2O_3 在各个沙漠(沙地)的变异系数相差不是很大, 只有巴丹吉林沙漠的变异系数显著大于其余地区; Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 在各个区域的变异系数都较小; 所有样品中 MgO 和 CaO 的变异系数均较大。这个结果与刘维明[20]的我国西部粉尘源区表层物质分析结果类似。

2) 元素配分特征

UCC (上陆壳)标准化是研究元素特征主要方法, 为区域样品元素平均值与上陆壳平均值的比值。

同一个沙漠(沙地)的不同采样点不同地区的地质、气候差异在元素配分会有所体现。图 4(b)中库布其沙漠巴音淖尔样品 CaO 与其它样品相比, 上陆壳(UCC)富集, 其余区域则是亏损。巴丹吉林沙漠(图 4(e))的额济纳样品和柴达木沙漠(图 4(g))的平坦、东台和锡铁山西也是表现出 CaO 的富集。 Ca 元素是碳酸盐有紧密的联系[26], 而且碳酸盐和降雨是正相关的[27]。在同一个沙漠(沙地)采样点相差较远, 降雨量是有差异, 因此不同采样地点 CaO 有可能有富集或亏损。在巴丹吉林沙漠的额济纳采样点, 处于干旱区域, 相比沙漠公园采样点, 降雨少与塔克拉玛干沙漠相似[28]。毛乌素沙地、巴丹吉林沙漠和柴达木沙漠中 SiO_2 不同地点则表现出富集和亏损。在所测的其余氧化物除了巴丹吉林沙漠中额济纳采样点的 MgO 是富集的。其余所有的氧化物均是亏损的。而且同一个沙漠(沙地)样品变化趋势具有良好的一致性。

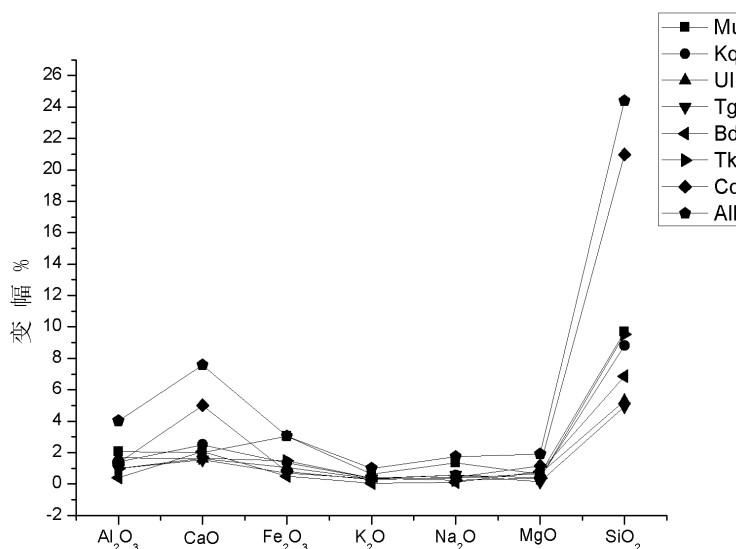


Figure 2. The oxide in different desert (sand)

图 2. 不同沙漠(地)氧化物含量图

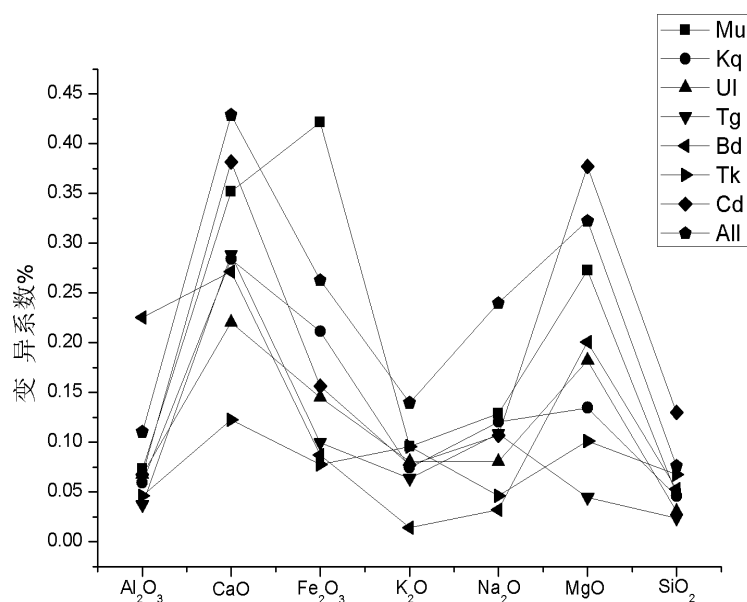


Figure 3. Variation coefficient of the same oxide in different deserts (sand)
图 3. 不同沙漠(沙地)同种氧化物的变异系数

图 4(h)中毛乌素沙地、库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠元素配分相似，都是只有 SiO_2 是富集，与洛川黄土和降尘于 CaO 、 Fe_2O_3 和 SiO_2 都有区别。柴达木沙漠、塔克拉玛干沙漠和洛川黄土元素配分相似，都是 CaO 富集，其余氧化物亏损。与降尘相比，降尘中的 MgO 和 Fe_2O_3 是富集的，其余元素配分相似。元素配分结果表明柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠的风沙十分的接近黄土高原的常量元素配分，这也间接证实了 Guan Qingyu [29]、TStevens [30]等人提出黄土高原物源并非来自于较近的巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地，而是来自更远的青藏高原、塔克拉玛干沙漠等地。

3.2.2. A-CN-K 图解

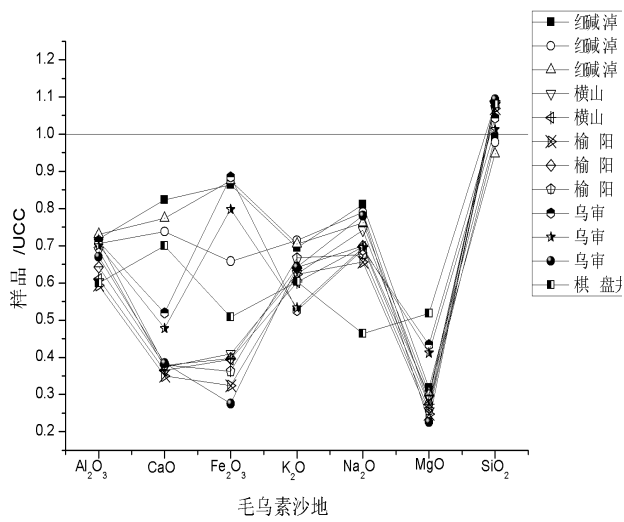
1) A-CN-K 图解与风化特征

为了量化化学风化趋势以及化学风化过程中的化学成分和矿物的变化，Nesbitt H W [31]等依据质量平衡原理、长石淋溶实验和矿物稳定性热力学基础提出 A-CN-K 图解大陆风化趋势预测模型。该模型在地质化学趋势研究和风化化学成分变化有广泛的应用[6] [23]。

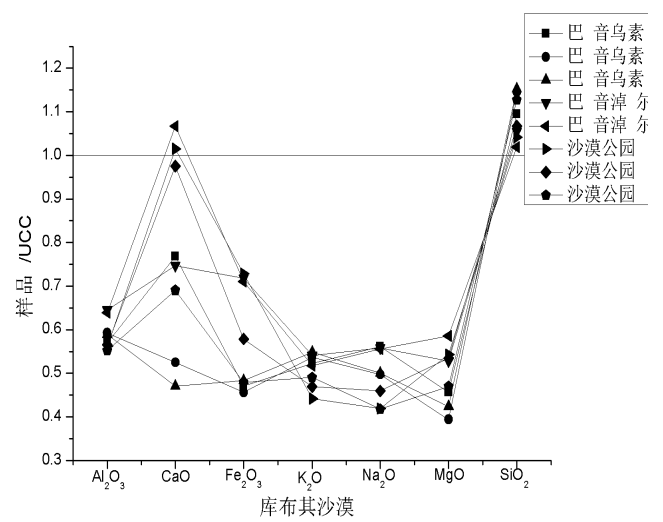
陆源页岩是上陆壳典型的风化产物，所以上陆壳(UCC)指向 PASS 是大陆风化趋势线。毛乌素沙地、库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和柴达木沙漠风化趋势线均是平行 A-CN 连线，说明以上区域在风化的初始阶段，处于脱钙、钠的层次，即斜长石风化的初步风化，而且毛乌素沙地的脱钙、钠程度要低于其他地区。库布其沙漠、乌兰布和沙漠和腾格里沙漠三者相似，落点均在斜长石和钾长石连线以上。塔克拉玛干沙漠也是处于初步的脱钙、钠阶段，就其风化特征和毛乌素沙地相似，巴丹吉林沙漠风化程度最高。但整个研究区域都处于风化的初步脱钙、钠阶段，只是其程度大小而已。我国西部气候干燥、降雨稀少，造成母岩风化的自然动力不足，是所研究区域风化程度不高的主要原因[23]。

2) CIA 和 Na/K

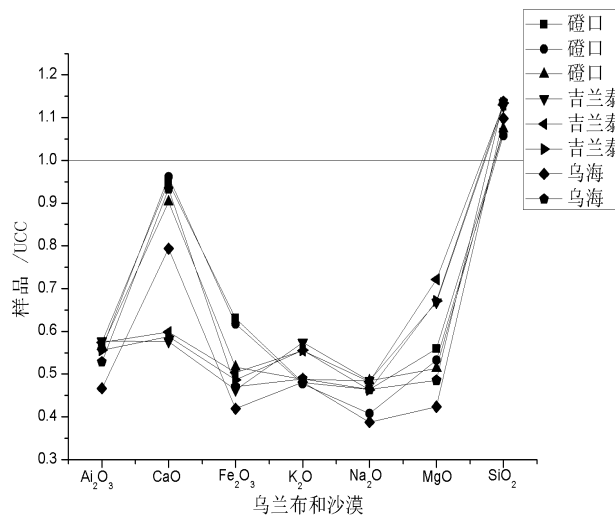
上陆壳风化程中最主要的变化的是上陆壳母岩中的长石矿物。长石风化时碱金属组成的粒子会首先从母岩中大量流失，而留下稳定的 Al_2O_3 [32]。根据此原理，Nesbitt [31]提出了表示化学风化程度的化学蚀变指数(CIA)，其表达式为：



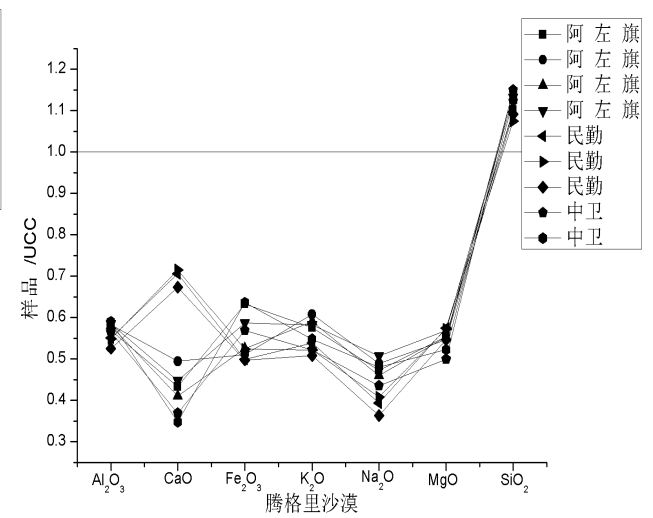
(a)



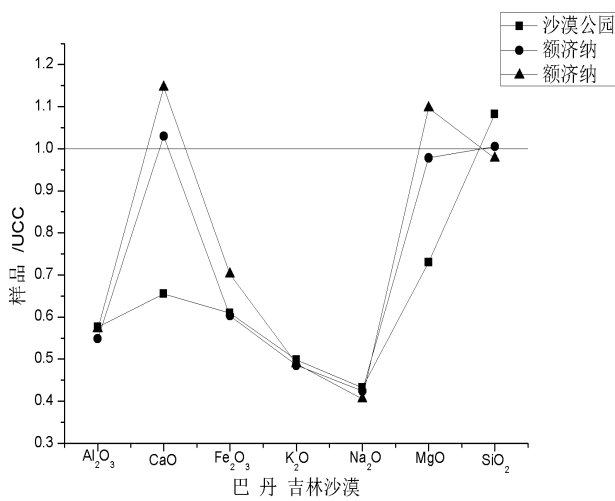
(b)



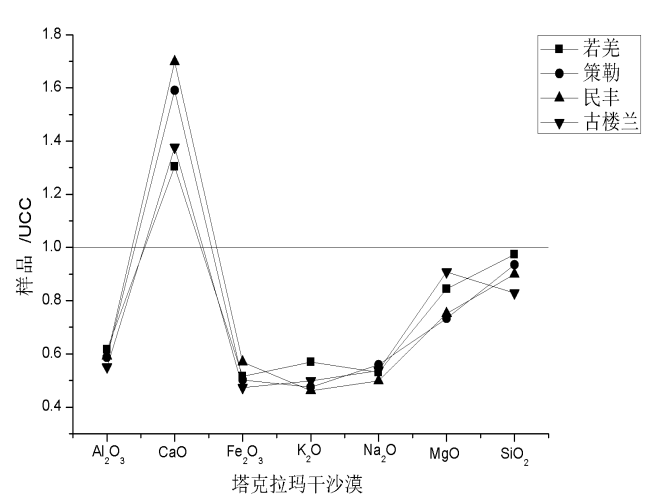
(c)



(d)



(e)



(f)

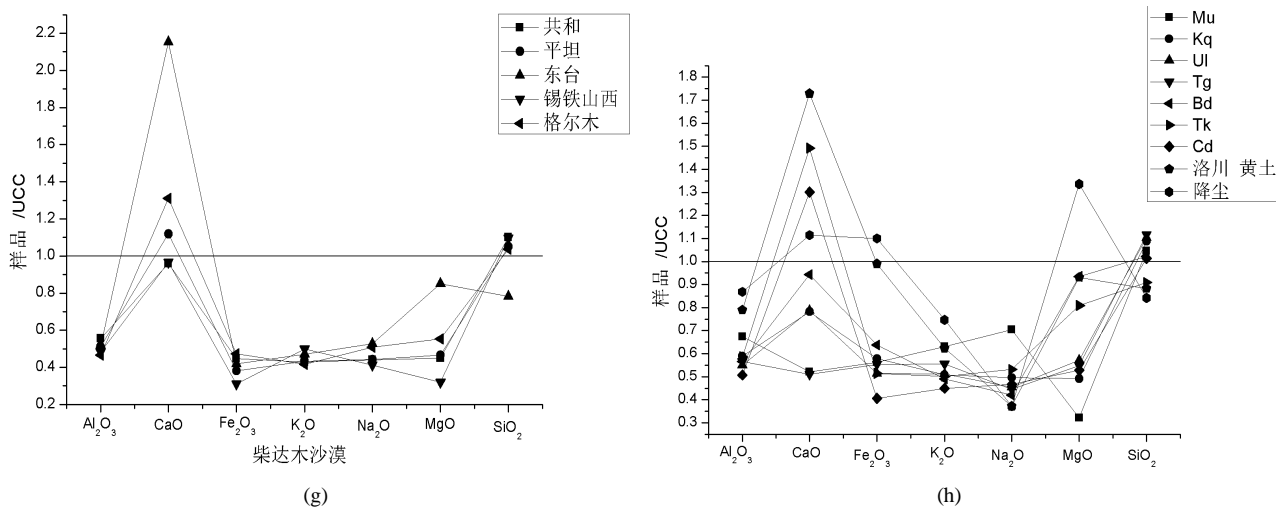


Figure 4. The element distribution characteristic chart
图 4. 元素配分特征图

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O} \times 100 \quad (1)$$

式中均为氧化物的分子摩尔数[33]，分化程度越强 CIA 越大。Na、K 都是活跃的化学物质，在风化作用中容易产生淋溶、迁徙，所以该指标常表征沉积物中化学风化程度，是衡量沉积物中斜长石风化程度指标。由于斜长石的风化速度大于钾长石，所以 Na/K (分子摩尔比)与风化程度是反比[34]。

如图 6 所示，CIA 和 Na/K 是负相关，相关系数为-0.598 (n = 49)。虽然个别样品有稍微的出入，是由于采样点空间差别较大，但是总体考虑还是可以从左到右分为三个层次：1) 毛乌素沙地。2) 柴达木沙漠、塔克拉玛干沙漠。3) 库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠。所有的样品都与洛川黄土和降尘有较大的区别，降尘有一部分是本地的，但是大部分都是来源于外地[35]，经过长距离传输的颗粒都是经过风选相比于沙尘源区小粒径占较大比例的颗粒[36]。颗粒较小则 CIA 值大，风化趋势强烈[4] [6] [22] [21]，关于黄土高原物源的来源问题有较大的争议[37]，洛川黄土和降尘的 CIA 和 Na/K 相似，可以初步确定黄土高原是降尘的堆积。

4. 讨论与结论

4.1. 讨论

4.1.1. 元素差异和各个沙漠(沙地)元素配分差异

地表碎屑常量元素特征不仅受到母岩特征控制[2] [4] [28]，还会受到地质地貌(主要为风、水等外力作用)、易溶盐影响[25]。降水量较少的区域地表的 Ca 元素则含量较高[27]，降水量大的地区含 Mg 元素的碎屑风化后容易造成 Mg 的淋失[25]。而本次采样横跨干旱和半干旱区域，降水量差别较大，在所有的样品中 Ca 的变异系数高达 43%、Mg 为 32%也证明地表的 Ca、Mg 元素含量与降水量有直接关系。而 K、Na、Si、Al、Fe 均受到粒径大小[4] [37] [38]和母岩的影响。在本次研究中，样品均在消解前都过 100 目筛选，即所有样品粒径均是小于 0.15 mm。因此这些元素差异主要是母岩和风化的不同造成的。

4.1.2. 风化特征

由于我国西部的气候原因，西部地区地表碎屑岩石风化外部动力缺失[23]致使长石的风化处于脱钙、钠的初步阶段。风化指数均是 50 左右，如图 5 所示，各个数据点都是与 A-CN 平行。相差不是很大，与

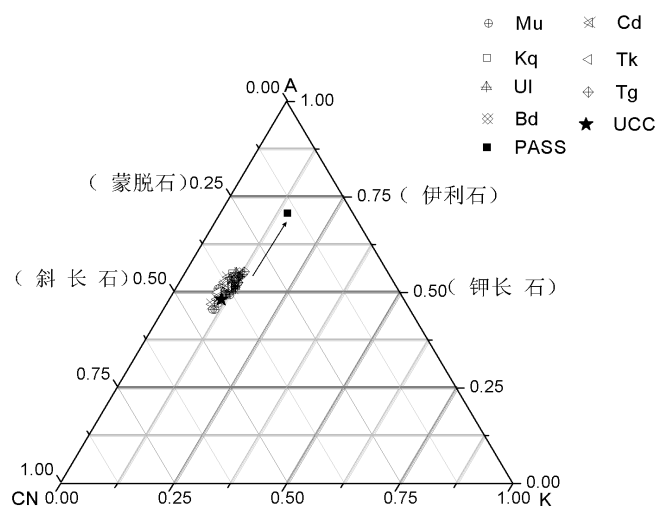


Figure 5. A-CN-triangle chart
图 5. A-CN-K 三角图

Zhijun Gong [39]等利用石英的释光也得到类似的结果,然而利用 CIA 与 Na/K 数据点分布图(图 6),可以看出从左到右分别为毛乌素沙地、柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠以及库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠。其中毛乌素沙地的绝大部分数据点处于未受化学风化区域, Na/K 值均是较大,这与毛乌素沙地独特的气候条件和沙地的物源有很大的联系[12] [30]。与毛乌素相似但又有区别的是柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠,两大沙漠采样数据点有几乎一半的点落在未受化学风化的区域,且这两大沙漠的元素配分也十分的相似(图 4),从沙漠物源的角度考虑,塔克拉玛干沙漠物源与天山、昆仑山[5]以及原始河流的冲积、沉积[2]、冰川过程、风积过程[12]都有紧密的联系。鲍峰[14]等通过矿物分析,总结了柴达木沙漠的物源是附近的高山(阿尔金山、阿腾能山等)碎屑通过一系列的风化和察尔汗盐湖退化后提供了大量的物源。虽然以上证据表明柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠物源有所不同,但从大陆板块考虑这两大沙漠分别属于柴达木板块和塔里木板块[40],并且研究发现两者在 O [41]、Si、Nd、Sr [42]都非常相似并且与其他地区有显著的不同,这就说明两者在原始岩石或者板块有相似性[39]。

库布其沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠在分布图数据点落的区间是相似的,这四大沙漠(沙地)样品都是 CIA 均大于 50,且 Na/K 分子摩尔比较小。从地理位置考虑,这四大沙漠(沙地)均距离较近,库布其沙漠和乌兰布和沙漠、巴丹吉林沙漠被黄河分割,腾格里沙漠和乌兰布和沙漠、巴丹吉林沙漠只有贺兰山之隔,自然条件相似。而且无论通过锆石形态[12] [43]还是通过 U-Pb 重矿物的特征研究[44]都表明这四大沙漠之间都有千丝万缕的联系。而且这四大沙漠均处在阿拉善板块[40],有相似的同位素特征[42]。

在所有的样品中均与洛川黄土和降尘有明显的区别,洛川黄土和降尘的风化程度更高,主要是因为黄土高原是沙漠化的过程,是降尘的堆积[45],降尘是风选的较小的颗粒[36],而颗粒越小其风化程度也越高[37]。

4.2. 结论

通过对七大沙漠(沙地)的常量元素分析, Mg 和 Ca 的变异系数最大而且具有很好分辨率,因此在研究沙尘物源地表的地质特征和降尘物源分析中是非常合适的目标元素。

在我国广袤的西部地区,人烟稀少、植物覆盖度较低、自然条件恶劣。外在驱使地表风化的动力不足,因此在所研究的七大沙漠(沙地)地表碎屑风化程度低,普遍处于初等化学风化状态。

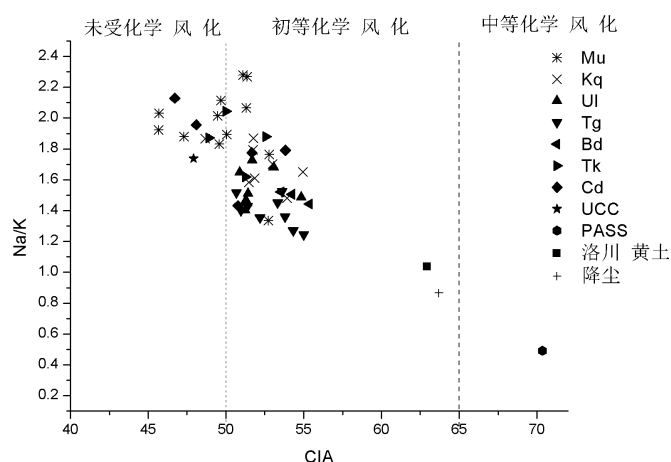


Figure 6. Weathering characteristic chart
图 6. 风化特征图

常量元素配分特征表明, 洛川黄土元素配分接近于塔克拉玛干沙漠和柴达木沙漠的特征, 与其余的地区有较大的区别, 所以可以初步确定黄土高原的降尘是来源于塔克拉玛干沙漠和柴达木沙漠。

沙漠(沙地)碎屑的形成, 要经过母岩、风化、搬运、沉积等一系列的作用, 有的甚至会重复出现以上作用, 所以决定地表碎屑物化学组成的包括母岩的组成、风化的程度以及搬运或沉积的筛选。在本次研究中所有的样品都是统一经过 100 目筛子的筛选, 所有的采样点风化程度都比较相似, 处于 50 左右。但在经过风化指数和元素配分的综合考虑后, 可将研究区域划分为三个层次, 分别为: 1) 毛乌素沙地, 2) 柴达木沙漠和塔克拉玛干沙漠, 3) 巴丹吉林沙漠、乌兰布和沙漠、腾格里沙漠和库布其沙漠。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFC0501004)和国家自然科学基金项目(41371500)。

参考文献 (References)

- [1] Zhang, X.Y., Gong, S., Zhou, T., *et al.* (2003) Sources of Asian Dust and Role of Climate Change versus Desertification in Asian Dust Emission. *Geophysical Research Letters*, **30**, 2272. <https://doi.org/10.1029/2003GL018206>
- [2] Qi, Z.B., Jie, Y.J., Guang, Q.X., *et al.* (2014) Formation and Evolution of Sand Deserts in Xinjiang, Northwest China: Provenances of Desert Sands. *Journal of Geographical Sciences*, **24**, 177-190.
- [3] Zhu, Z., Liu, S., Wu, Z. and Di, X. (1986) Deserts in China. Desert Research, Academia Sinica, Lanzhou, 1-66.
- [4] Lu, T.Y. and Sun, J.M. (2011) Luminescence Sensitivities of Quartz Grains from Eolian Deposits in Northern China and Their Implications for Provenance. *Quaternary Research*, **76**, 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.vqres.2011.06.015>
- [5] Sun, J.M. (2002) Provenance and Forming Mechanisms of the Loess Sediments on the High Mountain Regions of Northwestern China. *Quatres*, in Press. <https://doi.org/10.1006/qres.2002.2381>
- [6] 王立强, 王亲. 河西走廊及其毗邻地区地表物沉积元素特征[J]. 西北地质, 2013, 46(2): 69-80.
- [7] 张小曳, 张光宇, 朱光华, 等. 中国源区粉尘的元素示踪[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(5): 423-430.
- [8] Honda, M. and Shimizu, H. (1998) Geochemical, Mineralogical and Sedimentological Studies on the Taklimakan Desert Sands. *Sedimentology*, **45**, 1125-1143. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1998.00202.x>
- [9] Hattori, Y., Suzuki, K., Honda, M., *et al.* (2003) Re-Os Systematic of the Taklimakan Desert Sands, Moraines and River Sediments around the Taklimakan Desert, and of Tibetan Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**, 1195-1205. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01206-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01206-1)
- [10] Yang, Y., Sun, Y.B., Chen, H.Y. and Long, M. (2014) Oxygen Isotope Signatures of Quartz from Major Asian Dust Sources: Implications for Changes in the Provenance of Chinese Loess. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **4**, 1121-1131.

- [11] Yang, X.P., Zhu, B.Q. and White, P.D. (2007) Provenance of Aeolian Sediment in the Taklamakan Desert of Western China Inferred from REE and Major Elemental Data. *Quaternary International*, **175**, 71-85. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.03.005>
- [12] 张翰之, 鹿化煜, 戈双文, 等. 中国北方沙漠/沙地锆石形态特征及其对物源的指示[J]. 第四纪研究, 2013, 33(2): 334-348.
- [13] Pell, S.D., Chivas, A.R. and Willmas, I.S. (1999) Great Victoria Desert: Development and Sand Provenance. *Australian Journal of Earth Science*, **46**, 289-299. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.1999.00699.x>
- [14] 鲍峰, 董治宝. 柴达木盆地沙漠地表沉积物矿物构成特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 90-98.
- [15] 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 29-39.
- [16] 熊洁. 全球主要沙尘源区分布及其沙尘气溶胶变化特征的模拟分布[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [17] 杨艳, 王杰, 田明中, 等. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 466-471.
- [18] 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 408-412.
- [19] Bory, A., Biscaye, P. and Grousset, F. (2003) Two Distinct Seasonal Asian Source Regions for Mineral Dust Deposited in Greenland. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1167-1178. <https://doi.org/10.1029/2002GL016446>
- [20] 刘维明, 杨胜利, 方小敏, 等. 中国西北主要粉尘源区地表物质的常量元素分析[J]. 中国沙漠, 2008, 4(28): 642-649.
- [21] Castallo, S., Moreno, T., Querio, X., Alastuey, L., Cuevas, E., Herrmann, L., Moumkalia, M., Gibboms, W., et al. (2008) Trace Element Variation in Size-Fractionated African Desert Dusts. *Journal of Arid Environments*, **72**, 1034-1045. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.12.007>
- [22] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1441-1451.
- [23] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和风化过程[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 53-58.
- [24] 赵贵海, 樊自立, 季方. 塔克拉玛干沙漠地区土壤元素背景值研究[J]. 干旱区研究, 1994, 11(2): 35-39.
- [25] 刘英俊. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 76-86.
- [26] 彭红霞, 李长安, 杨桂芳, 等. 黄土中碳酸盐含量变化及其古气候记录——以兰州红咀寺剖面为例[J]. 地质科技情报, 2003, 22(1): 53-55.
- [27] 郝永萍, 方小敏, 奚晓霞, 等. 青藏高原东北部及邻近地区土壤发育与气候定量模型的初步探讨[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1995, 31(2): 165-170.
- [28] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论(修订版) [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 9-90.
- [29] Guan, Q., Pan, B., Gao, H., et al. (2008) Geochemical Evidence of the Chinese Loess Provenance during the Late Pleistocene. *Palaeogeography*, **270**, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.08.013>
- [30] Stevens, T., Carter, A., Watson, T.P., et al. (2013) Genetic Linkage between the Yellow River, the Mu Us Desert and the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, **78**, 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.032>
- [31] Nesbitt, H.W. and Young, G.M. (1982) Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, **299**, 715-717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- [32] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London, 277.
- [33] McLennan, S.M. (1993) Weathering and Global Denudation. *Journal of Geology*, **101**, 295-303. <https://doi.org/10.1086/648222>
- [34] 陈昉, 陈骏, 刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红黏土的化学组成及化学风化特征[J]. 地质力学学报, 2001, 7(2): 23-43.
- [35] Zhang, X.Y., Gong, S.L., Arimoto, R., Shen, Z.X., Mei, F.M., Wang, D. and Cheng, Y. (2003) Characterization and Temporal Variation of Asian Dust Aerosol from a Site in the Northern Chinese Deserts. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **44**, 241-257. <https://doi.org/10.1023/A:1022900220357>
- [36] Wang, X., Dong, Z., Yan, P., et al. (2005) Surface Sample Collection and Dust Source Analysis in Northwestern China. *Catena*, No. 59, 35-53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2004.05.009>
- [37] Sun, J. (2002) Provenance of Loess Material and Formation of Loess Deposits on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, **203**, 845-859.

- [38] 李栋梁, 王涛, 钟海玲, 等. 中国北方沙尘暴气候成因及未来趋势预测[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 376-379.
- [39] Gong, Z., Sun, J. and Lü, T. (2015) Investigating the Components of the Optically Stimulated Luminescence Signals of Quartz Grains from Sand Dunes in China. *Quaternary Geochronology*, **29**, 48-57.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.06.004>
- [40] 葛肖虹, 任收麦, 刘永江, 等. 中国西部的大陆构造格架[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 1-7.
- [41] 侯圣山, 杨石岭, 孙继敏, 等. 风成沉积物 4-16 μm 石英氧同位素记录及其物质来源意义[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(6): 316-341.
- [42] 杨杰东, 陈俊, 饶文波, 等. 中国沙漠的同位素分区特征[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 516-524.
- [43] 谢静, 杨石岭, 丁仲礼. 黄土物源碎屑锆石示踪方法与应用[J]. 中国科学(地球科学), 2012, 42(6): 923-933.
- [44] 李云, 宋友桂, 聂军胜, 等. 基于 U-Pb 定年和单颗粒锆石粒径分析示踪中国黄土高原黄土和红粘土物源[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 380-389.
- [45] Lu, Y. (1985) A Brief History of Loess Studies in China. Loess and the Environment. China Ocean Press, Beijing, 1-7.
- [46] 汪海斌, 于英鹏, 刘现彬, 等. 黄土高原 S1 古土壤的地球化学特征及其对物源的指示[J]. 第四纪研究, 2011, 31(2): 339-349.
- [47] Zhuang, G., Guo, J., Yuan, H. and Zhao, C. (2001) The Compositions, Sources, and Size Distribution of the Dust Storm from China in Spring of 2000 and Its Impact on the Global Environment. *Chinese Science Bulletin*, **46**, 34-70.
<https://doi.org/10.1007/BF02900460>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org