

doi: 10.12029/gc20210423003

周亚龙, 郭志娟, 王乔林, 刘飞, 王成文, 宋云涛. 2025. 基于土地质量调查结果探讨雄安新区第四系沉积相元素组成特征与物质来源[J]. 中国地质, 52(2): 714–726.

Zhou Yalong, Guo Zhijuan, Wang Qiaolin, Liu Fei, Wang Chengwen, Song Yuntao. 2025. Discussion on the element composition characteristics and material sources of Quaternary sedimentary facies based on the land quality survey results in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 52(2): 714–726(in Chinese with English abstract).

基于土地质量调查结果探讨雄安新区第四系沉积相元素组成特征与物质来源

周亚龙^{1,2,3}, 郭志娟^{1,2,3}, 王乔林^{1,2,3}, 刘飞^{1,2,3}, 王成文^{1,2,3}, 宋云涛^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘要:【研究目的】探讨雄安新区第四系不同沉积相内土壤元素含量及其组成分布规律、控制影响因素及其沉积物质来源, 为研究区域古地理、表生地球化学环境等方面提供地球化学依据。【研究方法】本文利用雄安新区土地质量地球化学调查与监测获取的表层土壤元素含量数据, 通过元素含量或比值示踪等多元统计方法, 揭示了区域元素地球化学分布规律与表生环境的关系。【研究结果】冲湖积平原亚区土壤具有低 SiO_2 和 Na_2O , 高 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 和 Na/Rb 特征; 冲洪积平原亚区土壤具有高 SiO_2 和 Na_2O , 低 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 Ca/Ba 特征。研究区土壤地球化学常量元素的分布主要受沉积物源区化学风化程度的控制, 同时表生环境对常量元素的贫化富集也存在一定的影响。源区目前处于以斜长石风化为主的中等化学风化程度阶段, 风化产物未遭受钾交代影响。区内各沉积相土壤样品成土母质物源主要来自雄安新区西侧太行山隆起的成熟大陆石英质物源区, 同时在冲湖积平原亚区的洼地小区内还存在部分少量的样品成土母质来源于基性火山岩物源区和中性岩火成物源区。【结论】土壤元素含量、元素比值、元素组合(Rb-U-Ga 、 Fe-Mg-Ni-V 均一化累加和)等地球化学指标特征能有效指示区内各沉积相环境, 对成土母质特性具有示踪作用。

关键词: 表层土壤; 地球化学指标; 沉积相; 物源示踪; 环境地质调查工程; 雄安新区

创 新 点: (1)应用元素地球化学方法研究第四系沉积相特征; (2)基于土壤地球化学元素组成特征示踪了雄安新区物质来源, 为新区土壤环境地球化学评价提供依据。

中图分类号: S153; P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0714-13

Discussion on the element composition characteristics and material sources of Quaternary sedimentary facies based on the land quality survey results in Xiong'an New Area

ZHOU Yalong^{1,2,3}, GUO Zhijuan^{1,2,3}, WANG Qiaolin^{1,2,3}, LIU Fei^{1,2,3}, WANG Chengwen^{1,2,3}, SONG Yuntao^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

收稿日期: 2021-04-23; 改回日期: 2021-06-06

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189123、DD20230543)资助。

作者简介: 周亚龙, 男, 1984 年生, 正高级工程师, 主要从事土地质量地球化学评价研究工作; E-mail: zyalong@mail.cgs.gov.cn。

Sciences, Langfang 065000, Hebei, China; 3. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] This paper aims to investigate the distribution characteristics, the contents and distribution of soil elements in different sedimentary facies of Quaternary, the control factors and the sources of sediment materials in Xiong'an New Area, and to provide geochemical bases for the study of regional palaeogeographic evolution and epigenetic geochemical environments. **[Methods]** Based on the surface element content data obtained from the geochemical survey and monitoring of land quality in Xiong'an New Area, this study employs multivariate statistical methods (such as elemental content analysis and ratio tracing) to reveal the relationship between regional elemental geochemical distribution patterns and the epigenetic environment. **[Results]** The soil in the alluvial-lacustrine plain subregion has the characteristics of low value of SiO_2 and Na_2O , and high value of Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O and Na/Rb . The soil in the alluvial-diluvial plain subregion is characterized by high SiO_2 and Na_2O , and low Al_2O_3 , Fe_2O_3 and Ca/Ba . The distribution of soil geochemical major elements is primarily controlled by chemical weathering intensity of source sediments, while epigenetic environment also influences the depletion and enrichment of major elements. The source area is currently in the stage of moderate chemical weathering dominated by plagioclase weathering, with no evidence of potassium metasomatism in weathering products. The soil parent materials in each sedimentary facies are mainly derived from the mature continental quartz source of Taihang uplift on the west side of Xiong'an New Area. Additionally, in the subregion of alluvial plain, parent materials of a small proportion of samples are from mafic volcanic and neutral igneous rocks. **[Conclusions]** Geochemical indicators such as soil element contents, element ratios and element combinations (Rb-U-Ga , Fe-Mg-Ni-V) can effectively differentiate sedimentary facies environments in the study area and serve as reliable tracers for soil parent material properties.

Key words: surface soil; geochemical index; sedimentary facies; provenance identification; environmental geological survey engineering; Xiong'an New Area

Highlights: (1) Elemental geochemical methods were applied to study Quaternary sedimentary facies features. (2) Based on soil geochemical elemental composition characteristics, provenance tracing can provide foundational data for environmental geochemical assessment of regional soils in Xiong'an New Area.

About the first author: ZHOU Yalong, male, born in 1984, professor level senior engineer, mainly engaged in research on geochemistry evaluation of land quality; E-mail: zyalong@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20189123, No.DD20230543).

1 引言

表生环境系统中土壤元素含量及其地球化学组成特征与成土母质密切相关,同时还受沉积相、土壤理化性质等成壤环境的影响。虽然经历了表生地球化学作用和漫长的成壤过程,与成土母质相比发生了不同程度的富集或贫化,但是土壤中部分元素含量与比值却相对稳定,保留了母质大量原始的地球化学信息(杨守业和李从先, 1999; 朱立新等, 2002; 周国华等, 2002)。因此,利用地球化学性质相近的元素含量或比值及其组成特征上的差异定性分析和研究元素物质来源及其形成的沉积环境条件具备可行性。土壤和沉积物物质来源示踪方法众多(Cullers et al., 1987; Roser and Korsch, 1988;

赵红格和刘池洋, 2003; 徐亚军等, 2007; 毛光周和刘池洋, 2011; Haddadchi et al., 2013; Owens et al., 2016; 徐杰和姜在兴, 2019),如沉积学、矿物学、古地磁学、古生物学以及地球化学等。与其他物源示踪方法相比,地球化学具有自己独特的优势,但在分析中需要考虑对影响化学成分的地地质背景情况进行合理解释。

雄安新区位于华北平原区,自然地质背景条件是影响平原区土壤元素地球化学空间分布的主控因素,其中第四系沉积相是重要影响因素之一(张秀芝等, 2012; 张兆玮等, 2016)。本文利用土壤地球化学元素含量或比值示踪方法,探讨雄安新区土壤元素组成特征对第四纪沉积环境和成土母质物源的示踪作用,为研究区域古地理环境、表生地球化

学环境等方面提供地球化学依据,具有重要的应用价值。

2 研究区概况

研究区地理位置介于 38°41′~39°10′N、115°37′~116°19′E(图 1),区内西北高、东南略低,地面高程 5~20 m,坡降 0.2‰~0.7‰(马震等, 2021),地形开阔,植被覆盖率低,属暖温带季风型大陆性气候。研究区属海河流域的大清河水系,古河道众多,水系发育。研究区土地利用类型以耕地为主,土壤类型主要为潮土,容城北部零散分布少量褐土,白洋淀周边地区发育少量沼泽土。

前人利用冀中拗陷钻井岩心、测井和地震资料,对雄安新区前新生代地层发育特征进行了详细研究。研究区内古元古界—太古以片麻岩和斜长

角闪岩为主,中元古界长城系和蓟县系发育有石英砂岩、白云质砂岩和白云岩,古近系以湖相和河流相的砂岩、泥岩为主,局部发育砾岩和页岩(何登发等, 2018)。区内第四系以来表层沉积物以冲洪积、冲积和冲湖积物为主(郝爱兵等, 2018; 张竞等, 2018),其中第四系主要由砂、黏土以及砾石组成,层厚 348~437 m(何登发等, 2018);新近系主要由砂质黏土、砂组成,层厚 315~627 m(商世杰等, 2019)。

研究区位于太行山东麓平原向冲积平原的过渡带,属堆积平原地貌(Han et al., 2024)。根据成因类型及地表形态进一步划分为冲洪积平原亚区、冲湖积平原亚区、冲积平原亚区(马岩等, 2020; 韩博等, 2023)。冲洪积平原亚区位于雄安新区北部(图 2),主要分布在雄县乐善庄村—雄县县城—容

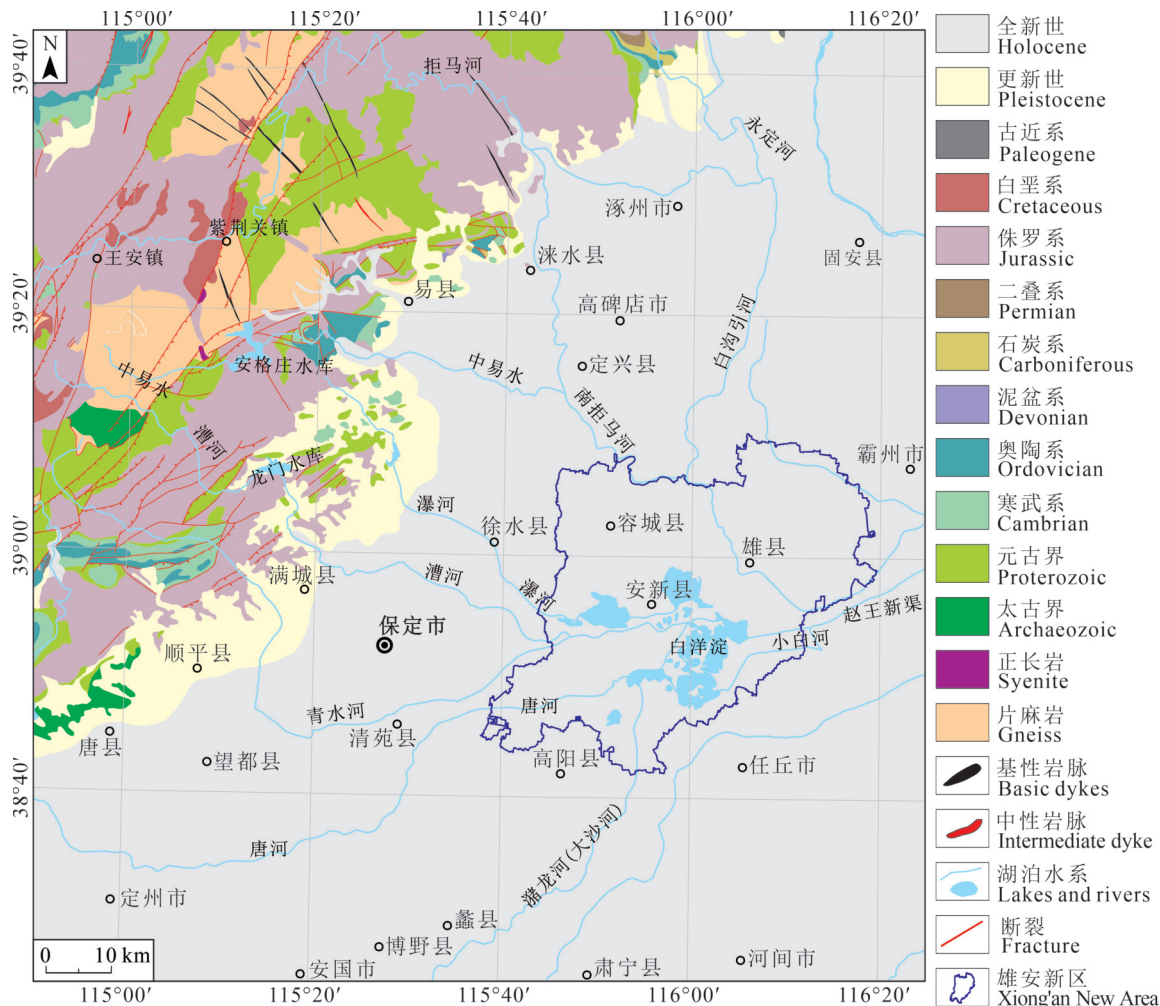


图 1 雄安新区及周边地质简图
Fig.1 Geological map of Xiong'an New Area and its surrounding area

城县小里镇一线以北。上部为近代河流冲积层或扇前洼地堆积物,下伏冲洪积层。冲湖积平原亚区位于雄安新区中南部地区,分布于雄县乐善庄村—雄县县城—容城县小里镇一线以南,由近代河流冲积和湖沼沉积形成。冲积平原亚区仅分布于南部边界局部地区。

3 采样与分析方法

本文研究数据来源于雄安新区土地质量地球化学调查与监测,系统采集区内表层 0~20 cm 深度的土壤样品 600 件(图 2)。土壤样品野外采集、加工严格按照 DZ/T 0295—2016 规范要求执行。土壤

样品经自然风干,过 10 目尼龙筛后送实验室分析测定 54 项指标。各项指标分析方法、检出限、精度和准确度等均满足 DZ/T 0258—2014 规范要求,插入的一级标准物质分析合格率 100%,重复性样品检验合格率为 99.7%;异常点样品检验总体合格率为 98.9%,分析测试数据通过中国地质调查局地球化学样品分析质量监控中心的验收,数据满足要求。

表生地球化学环境中元素地球化学行为差异是开展沉积环境研究和物质来源示踪方法研究的基础。如某些元素在母岩风化、剥蚀、搬运、沉积及成岩过程中不易迁移,几乎被等量地转移到碎屑

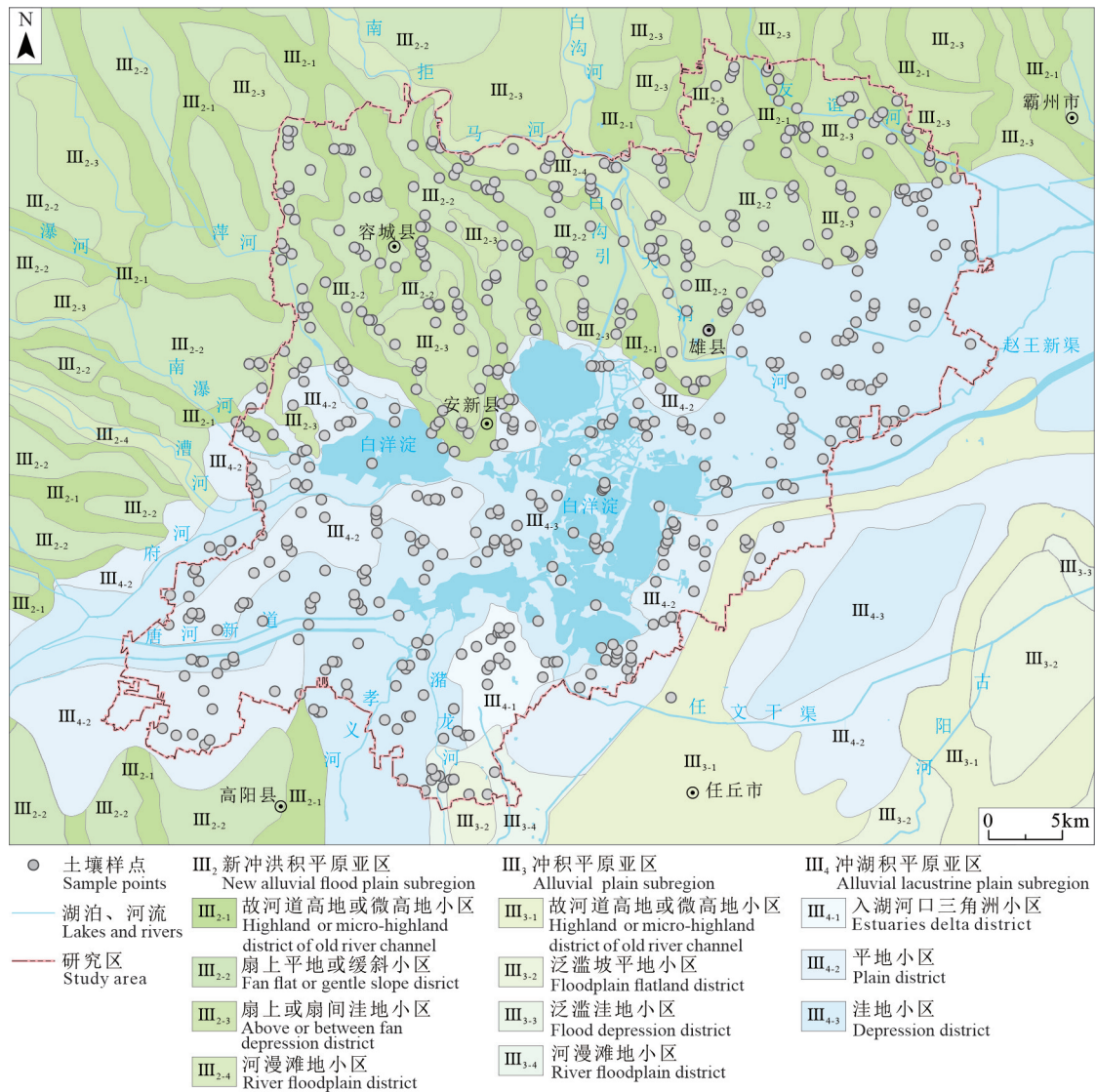


图 2 研究区地貌形态成因类型分区及土壤采样点
Fig.2 Genetic type division of geomorphic form and soil sampling points in the study area

沉积物中,因而可作为沉积物物源的示踪剂(毛光周和刘池洋, 2011; 徐杰和姜在兴, 2019)。基于不同元素化学性质及表生地球化学行为不同,对沉积环境具有“指示”或“标志性”的元素,在不同地质地貌环境中具有明显的空间分异性;且与成土母质具有较强的继承性,基本不受人为活动影响;化学性质活泼的元素易于迁移进入水体,而化学性质惰性的元素易于残留原地,这是造成表层土壤元素富集或贫化的主要因素。因此,选择常量化学组分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 及部分微量元素 Ba、Cr、Ga、Nb、Ni、Rb、Sc、Sr、Th、Ti、U、V 和 Zr 作为指示标志,利用其含量或比值等组成特征作为探讨沉积相的地球化学指标。

元素 Sc、 Al_2O_3 主要来源于自然母质(地壳岩石),无明显的人为源;具有较强的抗风化能力,不易受氧化还原条件、成土过程等各种自然作用的影响(Liaghati et al., 2004; 张秀芝等, 2006)。研究区土壤元素与 Sc、 Al_2O_3 相关性分析(表 1)显示,在自然作用过程中,选择的示踪元素指标与元素 Sc、 Al_2O_3 在 $P=0.01$ 置信水平上显著相关;各示踪元素指标与 Sc、 Al_2O_3 共消长,未受人为源影响。

4 结果与分析

4.1 不同沉积相土壤元素地球化学特征

4.1.1 土壤元素含量特征

雄安新区冲洪积平原亚区、冲湖积平原亚区、冲积平原亚区土壤元素含量特征统计结果(表 2)表明,在冲洪积平原亚区、冲湖积平原亚区和冲积平原亚区,研究区土壤中的常量化学组分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 及部分微量元素 Ba、Cr、Ga、Nb、Ni、Rb、Sc、Sr、Th、Ti、U、V、Zr 含量存在不同程度的差异。与冲积平原亚区和冲洪积平原亚区土壤中元素含量相比,冲湖积平原亚区土壤中元素含量显示出低 SiO_2 和 Na_2O , 高 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 K_2O 的特性,此外,冲湖积平原亚区土壤中微量元素 V、Cr、Ni、Ga、Rb、Sc、Th、U 的含量也明显高于其他两个单元。

冲积平原亚区和冲洪积平原亚区土壤中元素含量的差异表现在 MgO 、 CaO 及 Cr、Ga、Ni、Rb、Sc、Th、Ti、U、V、Zr 等元素。除 MgO 、 CaO 以外,其余元素均是在冲洪积平原亚区土壤中含量

表 1 研究区土壤元素指标与 Sc 和 Al_2O_3 的相关性

Table 1 Correlation between soil element indexes and Sc, Al_2O_3 in the study area

指标	Pearson 相关		Spearman 相关	
	Sc	Al_2O_3	Sc	Al_2O_3
Ba	0.377**	0.525**	0.418**	0.608**
Cr	0.895**	0.933**	0.867**	0.922**
Ga	0.930**	0.923**	0.901**	0.902**
Nb	0.770**	0.736**	0.820**	0.786**
Ni	0.966**	0.885**	0.966**	0.879**
Rb	0.916**	0.891**	0.919**	0.876**
Sc	1	0.897**	1	0.873**
Sr	-0.458**	-0.449**	-0.509**	-0.499**
Th	0.928**	0.807**	0.928**	0.783**
Ti	0.753**	0.838**	0.790**	0.883**
U	0.768**	0.605**	0.781**	0.601**
V	0.937**	0.961**	0.910**	0.953**
Zr	-0.768**	-0.743**	-0.746**	-0.723**
SiO_2	-0.786**	-0.661**	-0.774**	-0.655**
Al_2O_3	0.897**	1	0.873**	1
Fe_2O_3	0.953**	0.949**	0.937**	0.944**
MgO	0.755**	0.789**	0.703**	0.771**
CaO	0.345**	0.330**	0.302**	0.281**
Na_2O	-0.805**	-0.762**	-0.796**	-0.747**
K_2O	0.725**	0.858**	0.685**	0.823**

注: **代表在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

略低。

在不同的自然景观条件下,河流沉积物来自不同的汇水域,土壤成土母质物源存在差异。土壤中元素含量及其元素组合特征是成土母质源区物质组成、水动力条件和沉积环境等多种因素综合作用的结果。因此,土壤中元素含量及其组合特征可以作为成土母质物源和沉积环境的示踪指标。

4.1.2 土壤元素空间分布特征

堆积平原松散堆积物的元素含量除与成土母质类型密切相关之外,还受沉积相、土壤理化特征等环境的影响。如在滞水环境形成的湖相或冲湖积沉积物上发育的土壤中,由于土壤偏黏性,富含黏土矿物、有机质等吸附载体,微量元素易发生富集(张秀芝等, 2012; 张兆伟等, 2016)。研究区土壤元素空间分布与沉积单元耦合关系研究显示(图 3),土壤元素具有明显的空间分带性特征,与区内地貌形态成因类型基本吻合。石英等稳定的硅酸盐矿物多以碎屑沉积为主,迁移能力相对很弱,研究区西北部的拒马河携带的以石英为主的碎屑颗粒在离物源较近的冲洪积平原亚区故河道高地、扇上平地或缓斜地沉积,呈现 SiO_2 高值特征;在离母岩物

表 2 研究区第四系河湖沉积相土壤中元素地球化学指标统计
Table 2 Statistics of geochemical indicators of elements in sedimentary facies soil of rivers and lakes of Quaternary in the study area

指标	冲积平原亚区 (N=14)			冲洪积平原亚区 (N=254)			冲湖积平原亚区 (N=332)		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
SiO ₂	57.28	66.1	62.47	53.63	70.7	64.1	50.86	68.49	58.79
Al ₂ O ₃	10.91	14.45	12.49	10.41	16.26	11.94	9.46	17.79	13.04
Fe ₂ O ₃	3.74	6.75	5.16	3.35	7.03	4.4	3.49	8.21	5.34
MgO	1.9	2.84	2.38	1.67	4.22	2.46	1.79	3.93	2.71
CaO	3.29	5.9	4.02	1.85	9.06	4.32	2.19	9.12	5.16
Na ₂ O	1.59	2.46	2.09	1.23	2.83	1.99	0.73	2.66	1.63
K ₂ O	2.11	2.55	2.32	1.89	2.5	2.22	1.1	3.17	2.35
Ba	457	559	519	483	688	549	434	1129	549
Cr	55.56	88.76	71.66	49.05	92.91	64.82	47.92	106.53	73.07
Ga	14.3	20.25	17.09	13.27	22	15.76	12.94	24.95	17.74
Nb	12.99	16.04	14.22	10.98	15.1	13.3	10.9	16.5	13.98
Ni	22.3	46.7	33.48	19.49	46.83	28.92	13.48	58.86	35.73
Rb	85.06	113.62	98.44	72.33	127.11	89.02	77.8	142.39	102.99
Sc	8.95	16.36	11.91	8.25	16.96	10.69	8.72	20.32	13.00
Sr	176	231	200	159	360	221	141	338	206
Th	9.47	17.45	12.12	7.7	14.21	10.14	8.25	23.82	12.73
Ti	3407	4679	4037	3059	4520	3715	2772	5049	3882
U	1.62	2.62	2.05	1.39	3.09	1.95	0.74	3.36	2.27
V	65.1	111.2	85.7	60	120.6	76.5	55.6	136.6	89.1
Zr	171	362	252	162	369	241	115	347	202

注: 氧化物单位为%, 其余元素单位为mg/kg。

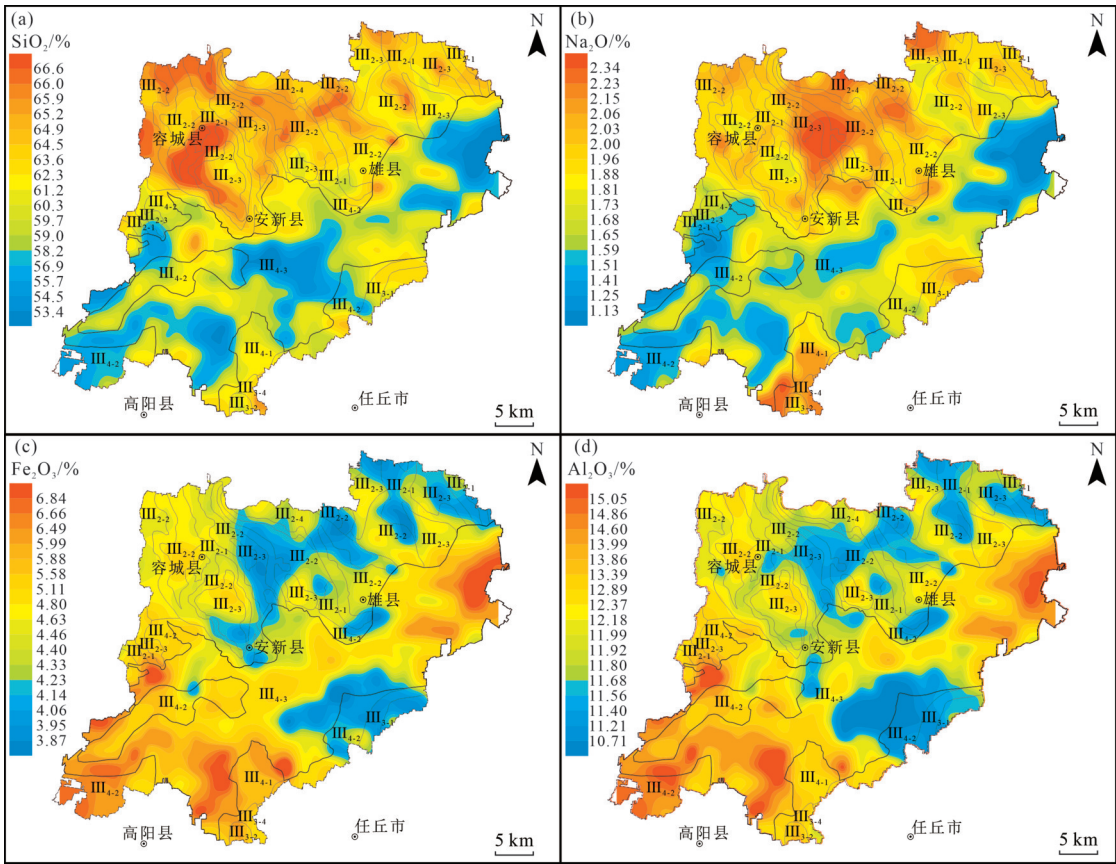


图 3 土壤元素指标地球化学场与沉积相耦合关系(图例同图 2)
Fig.3 Coupling relationship between geochemical field of soil element index and sedimentary facies (the legend is the same as Fig. 2)

源较远的水系下游冲湖积平原洼地小区、入湖河口三角洲小区中 SiO_2 含量显著偏低, 呈现低值特征(图 3a)。

研究区土壤中 Na_2O 地球化学空间分布特征与 SiO_2 类似(图 3b), 在冲洪积平原故河道高地、扇上平地或缓斜地呈现 Na_2O 高值特征。 Na 与 Ca 以完全类质同像的形式, 是斜长石中的组成元素。 Na_2O 在岩石中的含量随 SiO_2 含量升高而增加, 含长石较多的岩石中特别富集; 其易溶于水的化学性质决定了在风化成壤过程中易流失进入地表环境(成杭新等, 2019)。研究区西北部拒马河上游母质为太古宇阜平群中—基性岩和燕山早期岩浆岩, 因此在成土作用和河流搬运作用下, 在古河道、冲积扇等地区长石类矿物较多, 在花岗岩母质风化区的河道及冲积扇口地区出现 Na_2O 的高值区。

研究区土壤中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量空间分布特征与 SiO_2 不同, 其高值区与研究区冲湖积平原的沉积洼地空间分布非常吻合, 而低值区与冲洪积平原故河道、扇上平地小区的空间分布基本一致(图 3c、d)。在以冲积相为主的成土母质区, 土壤中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量较低; 在湖积相为主的成土母质区, 土壤中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量较高; 在以洪积相为主的成土母质区, 土壤中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量介于上述两者之间。 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与 SiO_2 地球化学空间分布差异与其表生地球化学特征有关, 在以冲积相为主的河道内水动力条件较强, 颗粒细小的黏土矿物、铁氧化物、有机质等易被水流冲至下游, 在水动力条件减弱的地势低洼处沉积, 形成黏土矿物、铁氧化物和有机质等相对富集的成土母质。

4.2 不同沉积相土壤元素地球化学比值与组合特征

4.2.1 土壤元素比值

同族碱金属元素 Na 、 K 和 Rb 具有相似的化学性质, 因其离子半径的差异导致在表生地球化学环境中存在行为差异, Rb 易被载体吸附, 而 Na 能够长距离迁移, 基于此行为差异, 可利用 Na/Rb 和 Na/K 比值特征指示沉积环境。研究区土壤中 Na_2O 和 K_2O 、 Na_2O 和 Rb 含量相关系数为 0.597 和 0.816, 在 $P=0.01$ 置信水平下, 均呈显著负相关(图 4); 反映研究区土壤中 Na 、 Rb 贫化与富集在空间分布上正好相反, Na/Rb 地球化学场与沉积相耦合关系清晰地反映了区内沉积相分布(图 5a)。研究区西北部因拒马河冲积形成的冲洪积平原故河道由于长石类矿物较多、无黏质土壤吸附载体而出现高 Na 、低 Rb 的地球化学分布特征; 且 Na/Rb 地球化学高值轴向与古水流方向具有高度一致性; 在冲湖积洼地小区富含则出现高 Rb 、低 Na 的特征, Na/Rb 低值区与冲湖积平原低洼地范围吻合。

在成土母岩风化过程中, 同为碱土元素 Ca 和 Ba 易被淋滤出来, 但是风化后 Ba 的碳酸盐和硫酸盐均难迁移、易沉淀, Ca 则比较容易迁移流失, 空间上 Ca 和 Ba 发生分离(张秀芝等, 2012)。研究区 Ca/Ba 比值地球化学空间分布特征显示(图 5b), 西北部的冲洪积平原亚区, 在冲积平原亚区扇山平地堆积物中 Ca 迁移流失, Ca/Ba 比值呈现低值特征, 而在白洋淀地区的冲湖积洼地小区接受沉积而呈现 Ca/Ba 比值高值特征。值得注意, 同为冲洪积平原亚区, 在研究区东北部管岗地区 Ca/Ba 比值呈现高值特征, 西北部容城地区 Ca/Ba 比值呈现高值特征, 造成这种差异的原因可能与其成土母质物源存

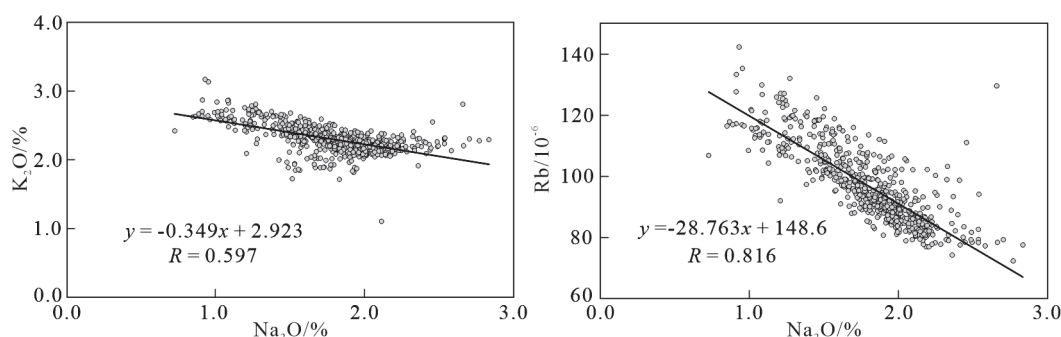


图 4 研究区土壤中 Na_2O – K_2O 和 Na_2O – Rb 相关性
Fig.4 Correlation between Na_2O – K_2O and Na_2O – Rb of soil in the study area

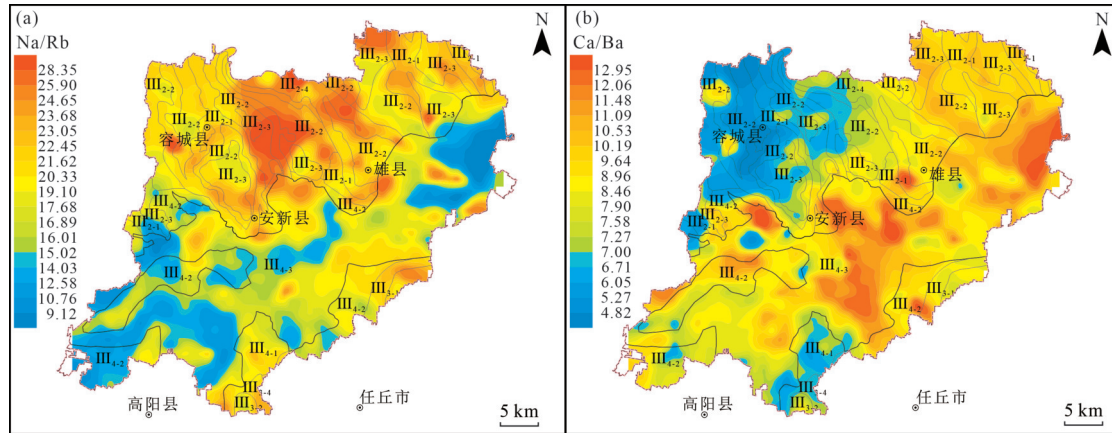


图 5 研究区 Na/Rb 和 Ca/Ba 地球化学场与沉积相耦合关系(图例同图 2)
Fig.5 Coupling relationship between geochemical fields of Na/Rb and Ca/Ba and sedimentary facies in the study area (the legend is the same as Fig. 2)

在差异有关,研究区以白沟河为界,其冲洪积平原亚区东、西物源应不同。东部胙岗地区为永定河物源区,具高钙、低镁特征;西部容城地区为拒马河物源区,具低钙、高镁特征。

4.2.2 土壤元素组合特征

在表生地球化学环境中,由于元素地球化学性质存在差异,导致土壤中元素组合在不同的沉积环境中存在贫化、富集差异。如 Rb、U、Ga 等大离子亲石元素组合,因其大分子迁移能力有限,易被土壤吸附;而 Fe、Mg、Ni、V 等不相容元素,易以细小的矿物颗粒态或溶解态发生迁移。因此在远离母岩的水系下游平原区洼地中因富含吸附载体(黏质土壤)而呈现富集特征,在吸附能力较差的河床地带中呈现贫化特征。研究区土壤 pH 值呈碱性特征, Rb、U、Ga 元素组合和 Fe、Mg、Ni、V 组合的均一化累加和在研究区中部白洋淀地区的冲湖积平原沉积洼地均呈现明显的高值富集特征;而在研究区北部地区的冲洪积平原故河道高地、扇上平地或扇间洼地均呈现明显的低值贫化特征(图 6)。

研究区土壤元素含量及其组合地球化学空间分布特征与第四系沉积相耦合关系研究表明,第四系沉积环境影响区内土壤地球化学元素的贫化、富集;基于土壤地球化学元素指标组成特征可以判别冲洪积故河道小区、冲湖积平原洼地小区等第四系沉积单元。土壤地球化学元素及其组合空间分布特征也从地球化学角度证实了研究区第四系沉积

单元划分的合理性。

5 讨论

5.1 土壤元素示踪物质来源探讨

前述研究区土壤元素含量及其组成特征与沉积相空间耦合结果显示,土壤中常量元素的贫化、富集受第四系沉积环境影响,同时部分元素组合特征除受沉积环境影响之外,还受成土母质的物质组成的控制。因此可通过土壤元素组成特征来判断成壤母质物源的变化,定性描述成壤母质的某些特性。如研究区 Ca/Ba 比值特征显示,即使处在相同的表生自然环境下,其土壤元素组成也可能受成土母质来源或者组成物的控制而不同。

沉积物的化学蚀变指数(CIA)作为一个判断源区化学风化程度的化学指标被广泛应用(Nesbitt and Young, 1982)。其计算公式为: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$, 式中主成分均指摩尔分数, CaO*指存在于硅酸盐矿物中 CaO(即全岩中的 CaO 扣除化学沉积的 CaO 的摩尔分数)。由于硅酸盐矿物中 CaO 与 Na_2O 通常以 1:1 的比例存在,所以认为当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时,可认为 $CaO^* = Na_2O$;而当 CaO 的摩尔数小于 Na_2O 时, $CaO^* = CaO$ (McLennan et al., 1993)。通常认为 $CIA \leq 50$, 其物源区岩石未遭受化学风化, CIA 越大,其物源区岩石遭受的化学风化越强烈。研究区 CIA 介于 59.4%~78.3%(图 7),均值为 67.9%,反映出区内物源区岩石遭受了中等程度的化学风化。研

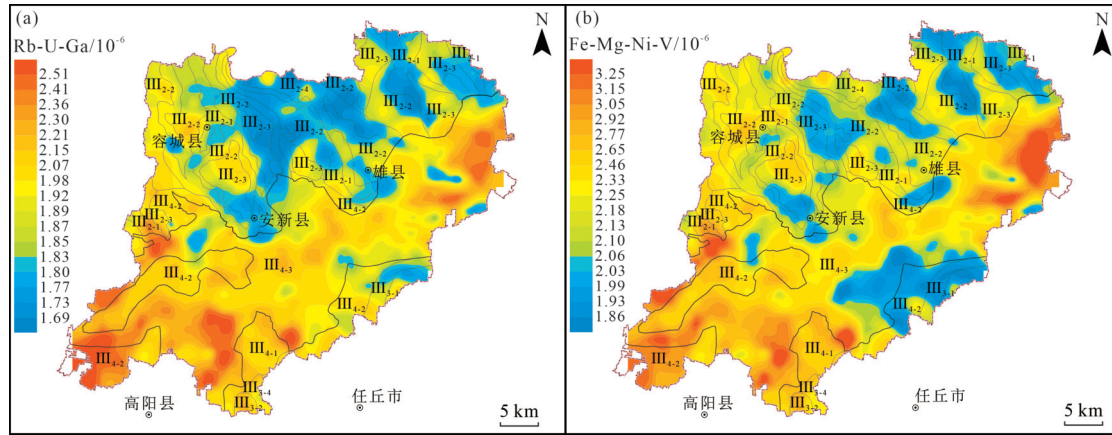


图 6 研究区土壤元素组合均一化累加和地球化学场与沉积相耦合关系(图例同图 2)

Fig.6 Coupling relationship between geochemical field of uniform accumulation of soil element assemblage and sedimentary facies in the study area (the legend is the same as Fig. 2)

究区内样品均位于斜长石-钾长石基线以上(图 7), 从冲洪积平原到冲湖积平原, 区内化学风化程度逐渐加强并靠近 A-K 线。在未受到钾交代作用的情况下, 斜长石-钾长石风化形成黏土的过程应沿着平行 A-CN 的方向进行, 随着化学风化程度加强, 风化趋势线逐渐与 A-K 线相交(Nesbitt and Young, 1996; 方海超等, 2019)。研究区内样品风化趋势线沿着平行 A-CN 的方向进行, 未于 A-K 线相交, 说明该源区风化产物未遭受钾交代影响, 目前处于以斜长石风化为主的阶段。

据商世杰(2020)对雄安新区及邻区全新统底界面附近的矿物组成研究显示, 其主要以蒙脱石、伊利石为主, 含量为 43.37%~49.23%, 白云石含量为 5.68%~13.99%。全新统底界面附近白云石含量明

显高于其他地层界面处, 并且自西向东, 随着距离的增加, 白云石的含量逐渐减少。雄安新区西侧太行山隆起内主要出露蓟县系和长城系的白云岩, 推测研究区西侧的太行山隆起为新区全新世提供主要沉积物源。

研究区土壤常量元素含量数据经 KMO 检验和 Bartlett's 球体检验, KMO 检验系数 $0.747 > 0.5$, Bartlett's 球体检验 P 值 < 0.05 , 表明各常量元素相关性强, 适合进行主成分分析。通过具有 Kaiser 标准化的正交旋转法, 旋转在 3 次迭代后收敛, 提取出控制元素分布的 2 个主成分, 贡献累积方差总和达 85.37%(表 3)。成分 F1 贡献方差达 53.56%, F1 因子中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 五种常用元素指标和 CIA 为显著正载荷, Al_2O_3 是黏土矿物的主要组成元素, 自生沉积作用对沉积物中 TiO_2 总含量影响甚微(Murray et al., 2000), TiO_2 可以看作是陆源碎屑沉积物的代表, 因此, 成分 F1 可以反映研究区表层土壤成土母质为陆源碎屑组成, 其物源区成土母质化学风化程度是影响常量元素空间分布的主控因素。成分 F2 贡献方差达 31.81%, F2 因子中 SiO_2 和 Na_2O 为显著负载荷, CaO 为显著正载荷。 SiO_2 多以碎屑沉积为主, 而 Ca 、 Na 流失是表生环境影响元素贫化富集的显著标志, 因此, 成分 F2 反映表生环境对常量元素的空间分布具有一定的控制作用。

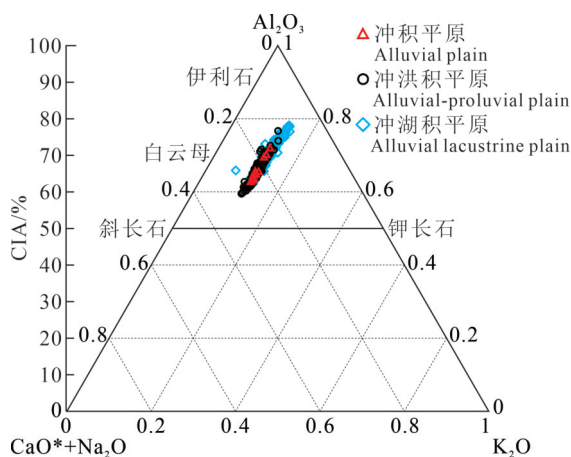


图 7 研究区土壤样品 A-CN-K 图解

Fig.7 Diagram of A-CN-K of soil samples in the study area

表 3 研究区土壤样品常量元素旋转矩阵
Table 3 Rotation matrix of major elements in soil samples in study area

分析要素	成份	
	F1	F2
TiO ₂	0.94	-0.012
SiO ₂	-0.445	-0.813
Al ₂ O ₃	0.922	0.331
Fe ₂ O ₃	0.902	0.372
MgO	0.715	0.452
CaO	0.016	0.908
Na ₂ O	-0.589	-0.712
K ₂ O	0.803	0.269
CIA	0.756	0.588
贡献方差/%	53.56	31.81
累积方差/%	53.56	85.37

源区的性质是基性、中性、酸性火山岩物源区还是成熟大陆石英质物源区。区内常量元素 F_1' - F_2' 判别方程函数分析表明, 各沉积相土壤样品成土母质物源主要来自成熟大陆石英质物源区, 同时在冲湖积平原亚区的洼地小区内还存在部分少量的样品成土母质, 其来源于基性火山岩物源区和极少量的中性火山岩物源区(图 8)。落入基性火山岩物源区和极少量的中性火山岩物源区的样品主要分布于研究区冲湖积平原亚区的洼地小区, 地理位置上位于雄安新区白洋淀周边地区, 土壤样品中常量元素 K_2O 介于 2.43%~2.87%, 均值为 2.61%, 呈现对高值特征。

研究区西北侧山区以玄武岩的喷溢为主, 平原

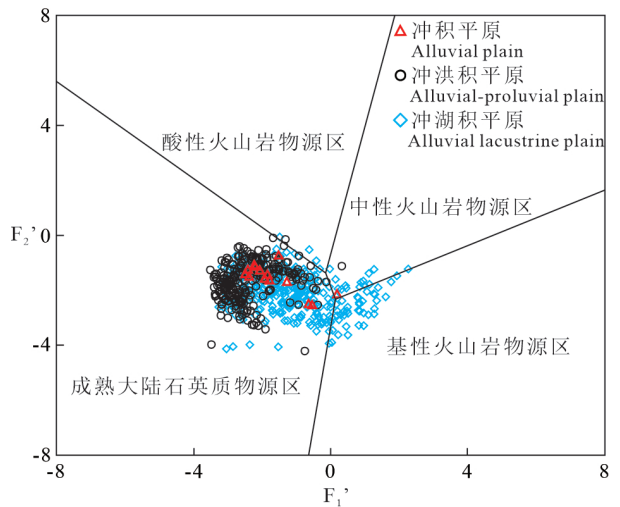


图 8 常量元素 F_1' - F_2' 判别方程函数图解
Fig.8 Diagram of F_1' - F_2' discriminant equation function of major elements

以中基性火山碎屑岩为主, 玄武岩较少。研究区内岩浆活动较弱, 但是研究区西侧太行山山前岩浆活动较强, 出露规模巨大岩浆岩带。研究区从新近纪到全新世均有岩浆活动, 主要为中更新世早期—中期, 岩浆活动规模大, 时间长(陈望和和倪明云, 1987)。此外, 太行山北段中生代岩浆作用规模巨大, 沿北北东向深大断裂分布有中生代的大河南、王安镇、大石峪、麻棚、赤瓦屋等基岩, 其地球化学具有独有的高钾特征(常兆山等, 2000; Gao et al., 2012; 张海东等, 2016)。因此研究区基性火山岩物源区、中性火山岩物源区推测来自研究区西侧太行山隆起太行山中北段来源杂岩体经风化剥蚀作用, 在中易水、南拒马河等河流的搬运作用下, 汇聚于研究区白洋淀周边。

5.2 元素组成的影响因素与地质环境意义

土壤元素示踪其物质来源的探讨基础是沉积物对母岩的主元素组合和重矿物组合的继承性。值得注意的是在成壤作用和表生地球化学环境的影响下, 成土母质中元素含量等特性可能会发生相应的变化。如化学风化、搬运方式和介质、迁移距离、不同物源区贡献的差异等因素都会影响其化学组成, 这些因素为利用土壤元素的地球化学特征进行物源分析判别带来了多解性与复杂性。

研究区内的白洋淀是华北平原中部地区地表、地下水的汇集排泄区, 冲积相和地表水流的搬运作用影响区内土壤元素含量和地球化学组成特征。研究区白洋淀汇水区, 经地表水流的冲刷搬运作用, 形成延伸方向与地表水流流向基本相同的洼地相沉积物, 其土壤元素具有高微量元素、低 SiO_2 和 Na_2O 。在洼地中心(白洋淀), 地表水水动力条件减弱, 沉积物水动力搬运作用减弱, 形成“静水”黏质沉积物。

地表水和地下水的化学溶滤作用也影响土壤中元素的迁移和分布。水溶液中元素的搬运形式主要以溶液、悬浮物、胶体溶液等形式被搬运。如风化成壤过程中 Na 、 K 、 Mg 、 Ca 等元素, 易形成易溶盐类(氯化物和硫酸盐)以溶液的形式流失进入水系, 由于其地球化学性质的不同, 上述元素在地表水动力环境中存在明显不同的迁移聚集特征, 虽然 Na 、 K 具有相似的地球化学性质, 但是 Na 的水化能大于 K , 水化能越大越不易被吸附, 导致 Na 更易

随水迁移, K 更易被黏土矿物或胶体等吸附(成杭新等, 2019), 这也是研究区 Na 在南拒马、白沟河等河流末端进入白洋淀地区出现聚集, 而 K 未聚集的原因。由于 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等在水中溶解度的不同, 在水动力驱动条件下, 其迁移聚集也呈现不同特征。

土壤中的元素以不同的形态存在, 其组成和空间分布主要受沉积物源区化学风化程度、表生地球化学环境等因素的影响控制。土壤中 Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Na、Ca、K 等常量元素主要以矿物形式存在, 而土壤矿物种类和含量是影响土壤物理化学性质、土壤环境质量的关键因素, 因此, 土壤氧化物等元素指标对探讨土壤质地、土壤环境等均具有十分重要的意义。土壤重金属污染源解析是土壤环境评价重要内容之一, 土壤重金属污染来源分为自然来源和人类活动来源, 自然来源主要来自土壤成土母质和成土过程。基于土壤地球化学元素含量或比值与成土母质的继承关系, 可以判别土壤中重金属污染源是自然源还是人为源。土壤中黏土矿物的总量和不同类型黏土矿物含量是土壤质地等土壤理化性质的主要影响因素, 其控制和支配着土壤微量元素的地球化学行为, 不同黏土矿物对重金属污染物的吸附作用也不同, 因此查明研究区土壤元素组成特征及其物质来源可为土壤污染修复治理等环境保护提供自然解决方案奠定基础。

6 结 论

(1) 研究区土壤元素地球化学空间分布具有明显的分异分带特征, 其元素含量、比值、组合等地球化学指标特征能有效指示区内各沉积相。冲湖积平原亚区土壤具有低 SiO_2 和 Na_2O , 高 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 和 Na/Rb 特征; 冲洪积平原亚区土壤具有高 SiO_2 和 Na_2O , 低 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 Ca/Ba 特征。

(2) 物源区成土母质化学风化程度是影响研究区土壤常量元素空间分布的主控因素, 同时表生环境对常量元素的贫化富集也存在一定的影响; 源区目前处于以斜长石风化为主的中等化学风化程度阶段, 风化产物未遭受钾交代影响。土壤元素含量与成土母质关系密切, 具有较强的继承性。

(3) 土壤样品成土母质物源主要为成熟大陆石英质物源, 其次位于冲湖积平原亚区的洼地小区内存在部分样品成土母质物源为基性火山岩物源和极少量样品成土母质为中性火山岩物源; 地球化学元素示踪显示其成土母质物质来源主要为雄安新区西北侧太行山隆起区物源经风化剥蚀和中易水、拒马河等河流搬运作用下, 汇聚于研究区。

References

- Chang Zhaoshan, Feng Zhongyan, Chen Tingli. 2000. Research on the ultramafic rocks in the Laiyuan batholith, Hebei Province[J]. *Geology and Prospecting*, 36(3): 36–39 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Hangxin, Peng min, Zhao Chuandong, Han Wei, Wang Huiyan, Wang Qiaolin, Yang Fan, Zhang Fugui, Wang Chengwen, Liu Fei, Zhou Yalong, Tang Shiqi, Li Kuo, Yang Ke, Yang Zheng, Cheng Xiaomeng, Chen Ziwan, Zhang Hua, Mo Chunhu. 2019. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of distribution patterns of chemical elements in soil, Southwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(6): 159–191 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wanghe, Ni Mingyun. 1987. *Quaternary Geology of Hebei Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–186 (in Chinese with English abstract).
- Cullers R L, Barrett T, Carlson R, Robinson B. 1987. REE and mineralogical changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the wet mountains, Colorado, U.S.A.[J]. *Chemical Geology*, 63(3/4): 275–297.
- Fang Haichao, Huang Peng, Sun Jiawen, Yu Yonghai, Li Anchun. 2019. Provenance and controlling factors of major elements in graded components of sediments from the Yalu River[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 39(3): 72–83 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y F, Santosh M, Hou Z Q, Wei R H, Ma G X, Chen Z K, Wu J L. 2012. High Sr/Y magmas generated through crystal fractionation: Evidence from Mesozoic volcanic rocks in the northern Taihang orogen, North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 22(1): 152–168.
- Haddadchi A, Ryder D S, Evrard O, Olley J. 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: Review of tracers, sediment sources and mixing models[J]. *International Journal of Sediment Research*, 28: 560–578.
- Han Bo, Xia Yubo, Ma Zhen, Wang Xiaodan, Guo Xu, Lin Liangjun, Pei Yandong. 2023. Division of engineering geological strata, building of 3D geological structure and its application in urban planning and construction in Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 50(6): 1903–1918 (in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Wu Aimin, Ma Zhen, Liu Futian, Xia Yubo, Xie Hailan,

- Lin Liangjun, Wang Tao, Bai Yaonan, Zhang Jing, Meng Qinghua. 2018. Geo-environmental condition and feasibility assessment of the deep underground space in Shanghai city[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 513–522 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. Three-dimensional geological structure of Xiong'an New District: Constraints from reflected seismic data[J]. *Science in China, Earth Science*, 48(9): 1207–1222 (in Chinese with English abstract).
- Han B, Ma Z, Lin L J, Liu H W, Gao Y H, Xia Y B, Li H T, Guo X, Ma F, Wang Y S, Zhou Y L, Li H Q. 2024. Planning and construction of Xiong'an New Area (city of over 5 million people): Contributions of China's geologists and urban geology[J]. *China Geology*, 7(3): 382–408.
- Liaghati T, Preda M, Cox M. 2004. Heavy metal distribution and controlling factors within coastal plain sediments, Bells Creek catchment, southeast Queensland, Australia[J]. *Environment International*, 29(7): 935–948.
- Ma Yan, Li Hongqiang, Zhang Jie, Sun Sheng, Xia Yubo, Feng Jie, Long Hui, Zhang Jingmao. 2020. Geophysical technology for underground space exploration in Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(4): 535–542 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696 (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangzhou, Liu Chiyang. 2011. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(4): 337–348 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel M J, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics[C]//Jonhanson M J. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Boulder: Geological Society of America, 21–40.
- Murray R W, Knowlton C, Leinen K W, Mix A C, Polsky C H. 2000. Export production and terrigenous matter in the central equatorial Pacific Ocean during interglacial oxygen isotope stage 11[J]. *Global and Planetary Change*, 24(1): 59–78.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering effects of abrasion and sorting on bulk composition mineralogy[J]. *Sedimentology*, 43(2): 243–358.
- Owens P N, Blake W H, Gaspar L, Gateuille D, Koiter A J, Lobb D A, Petticrew E L, Reiffarth D G, Smith H G, Woodward J C. 2016. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications[J]. *Earth-Science Reviews*, 162: 1–23.
- Roser B P, Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139.
- Shang Shijie, Feng Chengjun, Tan Chengxuan, Qi Bangshen, Zhang Peng, Meng Jing, Wang Miaomiao, Sun Mingqian, Wan Jiawei, Wang Huiqing, Xiang Xinxuan. 2019. The application of comprehensive geophysical-drilling exploration to detecting the buried faults in Xiongan New Area and neighboring areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(6): 836–846 (in Chinese with English abstract).
- Shang Shijie. 2020. Study on Quaternary Activity of Main Buried Faults and Strata Mineral Composition in Xiong'an New Area and Neighboring Areas[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–58 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Jiang Zaixing. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: Current research status and prospect[J]. *Journal of Palaeogeography*, 21(3): 379–396 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2007. Prospects of sediment provenance analysis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(3): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shouye, Li Congxian. 1999. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. *Acta Electronica Sinica*, 14(2): 164–167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haidong, Liu Jianchao, Wang Jinya, Zhang Sunan, Hu Bo, Wang Dequan, Han Song. 2016. Petrology, geochronology and geochemistry characteristics of Wang'anzen complex in the northern Taihang Mountain and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 727–745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Ma Zhen, Wu Aimin, Bai Yaonan, Xia Yubo. 2018. A study of paleochannels interpretation by the spectrum of lithology in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 542–548 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Bao Zhengyu, Tang Junhong. 2006. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Ma Zhongshe, Wei Jing, Wang Huimin. 2012. The use of geochemical characteristics of elements in the study of Quaternary sedimentary environment in the Hebei Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 194–205 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaoyi, Jin Song, Wang Jianwu, Yang Hongbin, Wang Keping, Xiao Wenxian, Bi Li. 2016. A study of Quaternary geomorphologic geological unit based on element geochemical field[J]. *Geophysical*

- and Geochemical Exploration, 40(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(3): 409–415 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guohua, Ma Shengming, Yu Jinsong, Zhu Lixin, Wang Hui. 2002. Vertical distribution of elements in soil profiles and their Significance for geological and environmental[J]. Geology and Exploration, 38(6): 70–75 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lixin, Ma Shengming, Zhou Guohua, Zheng Ligu. 2002. Characters of soil elements and its tracing application in alluvial plain[J]. Geology and Exploration, 38(4): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 常兆山, 冯钟燕, 陈廷礼. 2000. 河北涞源岩基中的超镁铁质岩研究[J]. 地质与勘探, 36(3): 36–39.
- 成杭新, 彭敏, 赵传冬, 韩伟, 王惠艳, 王乔林, 杨帆, 张富贵, 王成文, 刘飞, 周亚龙, 唐世琪, 李括, 杨柯, 杨峥, 成晓梦, 陈子万, 张华, 莫春虎. 2019. 表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J]. 地学前缘, 26(6): 159–191.
- 陈望和, 倪明云. 1987. 河北第四纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1–186.
- 方海超, 黄朋, 孙家文, 于永海, 李安春. 2019. 鸭绿江端元粒度分级样品常量元素控制因素分析及物源识别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(3): 72–83.
- 韩博, 夏雨波, 马震, 王小丹, 郭旭, 林良俊, 裴艳东. 2023. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用[J]. 中国地质, 50(6): 1903–1918.
- 郝爱兵, 吴爱民, 马震, 柳富田, 夏雨波, 谢海澜, 林良俊, 王涛, 白耀楠, 张竞, 孟庆华. 2018. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 39(5): 513–522.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1207–1222.
- 马岩, 李洪强, 张杰, 孙晟, 夏雨波, 冯杰, 龙慧, 张京卯. 2020. 雄安新区城市地下空间探测技术研究[J]. 地球学报, 41(4): 535–542.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677–696.
- 毛光周, 刘池洋. 2011. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 33(4): 337–348.
- 商世杰, 丰成君, 谭成轩, 戚帮申, 张鹏, 孟静, 王苗苗, 孙明乾, 万佳威, 王惠卿, 项歆璇. 2019. 雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 地球学报, 40(6): 836–846.
- 商世杰. 2020. 雄安新区及邻区主要隐伏断裂第四纪活动性与地层矿物组成研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–58.
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. 古地理学报, 21(3): 379–396.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 2007. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报, 26(3): 26–32.
- 杨守业, 李从先. 1999. REE 示踪沉积物物源研究进展[J]. 地球科学进展, 14(2): 164–167.
- 张海东, 刘建朝, 王金雅, 张苏楠, 胡波, 王得权, 韩松. 2016. 太行山北段王安镇杂岩体岩石学、年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 32(3): 727–745.
- 张竞, 马震, 吴爱民, 白耀楠, 夏雨波. 2018. 基于岩性光谱特征的雄安新区地面古河道识别研究[J]. 地球学报, 39(5): 542–548.
- 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 2006. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 25(1): 65–72.
- 张秀芝, 马忠社, 魏静, 王会敏. 2012. 利用元素地球化学特征研究河北平原第四纪沉积环境的探讨与实践[J]. 地学前缘, 19(4): 194–205.
- 张兆伟, 靳松, 王建武, 杨红宾, 王克冰, 肖文邈, 毕立. 2016. 基于元素地球化学场研究第四纪地貌地质单元[J]. 物探与化探, 40(1): 1–9.
- 赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 21(3): 409–415.
- 周国华, 马生明, 喻劲松, 朱立新, 王徽. 2002. 土壤剖面元素分布及其地质、环境意义[J]. 地质与勘探, 38(6): 70–75.
- 朱立新, 马生明, 周国华, 郑立果. 2002. 冲积平原区土壤元素组成特征及其示踪作用[J]. 地质与勘探, 38(4): 56–59.