

doi: 10.12029/gc20230731001

姚远, 赵禹, 刘三, 苏靖, 陈振宇, 梁楠. 2025. 绿洲农田土壤黏土矿物特征及其对土壤养分、重金属元素吸附的影响——以新疆开孔河流域绿洲区为例[J]. 中国地质, 52(3): 773–785.

Yao Yuan, Zhao Yu, Liu San, Su Jing, Chen Zhenyu, Liang Nan. 2025. Characteristics of clay minerals in oasis farmland soil and their effects on adsorption of soil nutrients and heavy metal: A case study of the oasis area in the Kaikong river basin, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 52(3): 773–785(in Chinese with English abstract).

绿洲农田土壤黏土矿物特征及其对土壤养分、重金属元素吸附的影响——以新疆开孔河流域绿洲区为例

姚远¹, 赵禹¹, 刘三¹, 苏靖², 陈振宇¹, 梁楠¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:【研究目的】黏土矿物对土壤质量起重要调控作用, 查明干旱绿洲区农田土壤黏土矿物特征, 对绿洲区土壤质量调控及农业发展具有重要意义。【研究方法】以新疆巴音郭楞州开都河—孔雀河流域干旱绿洲区农田土壤为研究对象, 通过 X-射线衍射图谱分析、相关性分析、三角图及风化指数分析方法对该区黏土矿物组成特征与物源演化、成土气候条件及其对土壤质量的影响进行探究。【研究结果】研究区黏土矿物类型主要为 2:1 型伊利石、伊/蒙混层矿物和绿泥石, 含少量的高岭石, 黏土矿物的物源为花岗岩, 演变规律为伊利石→伊/蒙混层矿物→绿泥石、高岭石; 研究区伊利石结晶度 IC 值为 0.35~0.62, 均值 0.44, 化学蚀变指数 CIA 值为 51.29%~62.57%, 均值为 58.24%, 成分变异指数 ICV 值为 1.09~3.69, 均值 2.65, 上述指标反映该区低温、干旱及风化作用程度较弱的成土期环境; 研究区土壤黏土矿物总量与土壤养分、重金属元素呈现正相关关系。【结论】开都河—孔雀河流域绿洲区黏土矿物组合类型为伊利石-伊/蒙混层矿物-绿泥石型; 绿洲区农田土壤黏土矿物能够通过吸附作用提升土壤养分元素水平、固定土壤重金属降低其农业风险, 从而提高土壤质量。

关键词: 黏土矿物; 重金属; 土壤养分; 农田土壤; 干旱绿洲区; 土壤质量; 环境地质调查工程; 巴音郭楞州; 新疆

创新点: (1) 选取开都河—孔雀河流域典型干旱绿洲区农田土壤为研究对象, 查明了新疆干旱绿洲区农田土壤的黏土矿物组成特征; (2) 阐明了干旱绿洲区农田土壤黏土矿物对土壤质量的影响。

中图分类号: P596 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0773-13

Characteristics of clay minerals in oasis farmland soil and their effects on adsorption of soil nutrients and heavy metal: A case study of the oasis area in the Kaikong river basin, Xinjiang

YAO Yuan¹, ZHAO Yu¹, LIU San¹, SU Jing², CHEN Zhenyu¹, LIANG Nan¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

收稿日期: 2023-07-31; 改回日期: 2024-03-18

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230556)资助。

作者简介: 姚远, 男, 1997 年生, 工程师, 主要从事土壤地球化学和生态地球化学工作; E-mail: YaoYuanSF@163.com。

通信作者: 赵禹, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事生态地球化学研究; E-mail: zhaoyu01@mail.cgs.gov.cn。

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2025, 52(3)

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

[Objective] Clay minerals play a crucial role in soil quality regulation. Identifying the clay mineral characteristics of farmland soil in arid oasis areas is of great significance to soil quality control and agricultural development. **[Methods]** This study focused on the farmland soil in the arid oasis area of the Kaidu-Kongque River Basin, Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, Xinjiang, and explored the characteristics of clay minerals composition, provenance evolution, soil-forming climatic conditions and their influence on soil quality through systematic analysis methods including X-ray diffraction pattern analysis, correlation analysis, triangular diagram analysis and weathering index analysis. **[Results]** The dominant clay mineral types in the study area are 2:1 illite, illite/smectite mixed-layer minerals, and chlorite, with a minor presence of kaolinite. The evolution sequence of the clay minerals, which originate from granite, is illite→illite/smectite mixed-layer mineral→chlorite and kaolinite. The illite crystallinity (IC value) ranges from 0.35 to 0.62, with an average of 0.44. The chemical alteration index (CIA value) ranges from 51.29% to 62.57%, averaging 58.24%. The compositional variation index (ICV value) ranges from 1.09 to 3.69, averaging 2.65. These indicators suggest a pedogenesis environment with low temperatures, aridity, and relatively weak weathering intensity. The total clay mineral content in the study area shows a positive correlation with soil nutrients and heavy metal elements. **[Conclusions]** The clay minerals assemblage in the oasis area of the Kaidu-Kongque River Basin is of the illite-illite/smectite mixed-layer mineral-chlorite type. Clay minerals play a significant role in enhancing soil nutrient levels and immobilizing heavy metal elements through adsorption, thereby improving soil quality.

Key words: clay minerals; heavy metals; soil nutrient; farmland soil; arid oasis area; soil quality; environmental geological survey engineering; Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture; Xinjiang

Highlights: (1) This paper focuses on the typical arid oasis area in the Kaidu river-Kongque river basin, and identified the clay mineral characteristics of the farmland soil in the arid oasis area. (2) The effect of soil clay minerals on soil quality in arid oasis area was clarified.

About the first author: YAO Yuan, male, born in 1997, engineer, mainly engaged in soil geochemistry and ecological geochemistry; E-mail: YaoYuanSF@163.com.

About the corresponding author: ZHAO Yu, male, born in 1988, engineer, mainly engaged in ecological geochemistry; E-mail: Zhaoyu01@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey(No.DD20230556).

1 引 言

土壤是农业生产的基础,土壤质量事关粮食安全。土壤是生物、气候、成土母质、地形、时间等因素的综合产物,影响土壤质量的因素众多,包括施肥、灌溉等人为因素以及土壤 pH、有机质含量、矿物组成等土壤自身的物理化学条件。其中,土壤黏土矿物的组成、结构和含量对土壤质量起到重要控制作用,黏土矿物是组成土壤的主要矿物成分,由云母、长石等原生矿物在地表风化形成的次生层状硅酸盐矿物(粒径 $<2\ \mu\text{m}$)构成,是土壤中最活跃的矿物组分(Velde and Meunier, 2008)。土壤常见的黏土矿物有蒙脱石、绿泥石、高岭石和伊利石等,这些黏土矿物具有良好的吸附性、膨胀性、离子交换性以及黏性,对土壤养分元素及重金属元素的迁移转化有着重要影响(Keller, 1970; Bergaya and Lagaly,

2006),从而影响土壤质量。研究表明,90%以上的土壤有机质与矿物共生(Crow et al., 2007),黏土矿物能够与有机质结合形成有机-无机复合体,从而对土壤有机质产生物理保护作用(师焕芝等, 2011),提升土壤肥力。同时,黏土矿物是植物与土壤界面反应的基质,能够为农作物提供必需的养分元素(郑庆福等, 2010),如:黏土矿物中固定的钾称为缓效钾(梁成华等, 2002),缓效钾在矿物风化过程中释放,形成速效钾,因此黏土矿物固定的钾可成为土壤钾素的重要来源,另一方面,黏土矿物表面吸附的磷酸盐在一定程度上也是土壤磷循环的重要组成部分。此外,由于良好的吸附能力,黏土矿物能够吸附固定重金属元素,降低其对环境的危害,保障粮食安全(Celis et al., 2000)。何宏平等(1999)研究了黏土矿物对重金属离子的吸附选择性,发现重金属离子的电价越高,半径越小,黏土矿物对其吸

附性越强。戴树桂等(2001)研究表明, 土壤黏土矿物吸附污染物的能力与黏土矿物类型及数量相关。目前, 土壤黏土矿物由于能够固定重金属、降低重金属的移动性和毒性, 已广泛应用于土壤污染修复领域(Uddin, 2017)。此外, 由于黏土矿物对气候环境变化十分敏感, 黏土矿物的组成、含量、矿物结晶度等特征记录了土壤成土时期的气候环境信息(Singer, 1984), 因此, 黏土矿物能够作为环境演变的标识矿物(Deconinck et al., 2000; Thiry, 2000)。

新疆干旱绿洲区土壤是一类特殊成因的土壤, 该地区具有特殊的气候环境条件、水文条件、地理条件以及地质条件(赵丽雯和吉喜斌, 2010), 由于降雨稀少, 蒸发强烈, 容易导致土壤荒漠化、肥力流失等一系列土壤质量问题, 从而影响绿洲区农业发展与粮食安全(牛芳鹏等, 2020), 而土壤中黏土矿物对土壤质量起到关键调控作用, 因此, 掌握干旱绿洲

区土壤黏土矿物组成及含量特征能够为地区土壤质量管控、土壤矿物修复及农业发展提供科学依据。目前关于新疆干旱绿洲区黏土矿物特征的报道十分有限, 因此, 本研究以新疆巴州开都河—孔雀河流域绿洲区土壤为研究对象, 调查了该区的黏土矿物含量组成特征, 分析了黏土矿物的形成、演变规律及形成时期的环境条件, 探究了黏土矿物对土壤养分、重金属元素的影响。

2 材料及方法

2.1 研究区概况及样品采集

研究区位于新疆巴音郭楞蒙古自治州, 介于 $41^{\circ}30'N\sim 42^{\circ}15'N$, $85^{\circ}40'E\sim 87^{\circ}10'E$ (图 1), 行政区涉及焉耆回族自治县、博湖县、和硕县、库尔勒市及周边地区, 研究区为典型的西北干旱绿洲区, 海拔 950~1100 m, 属于大陆性荒漠性气候, 表现为干旱

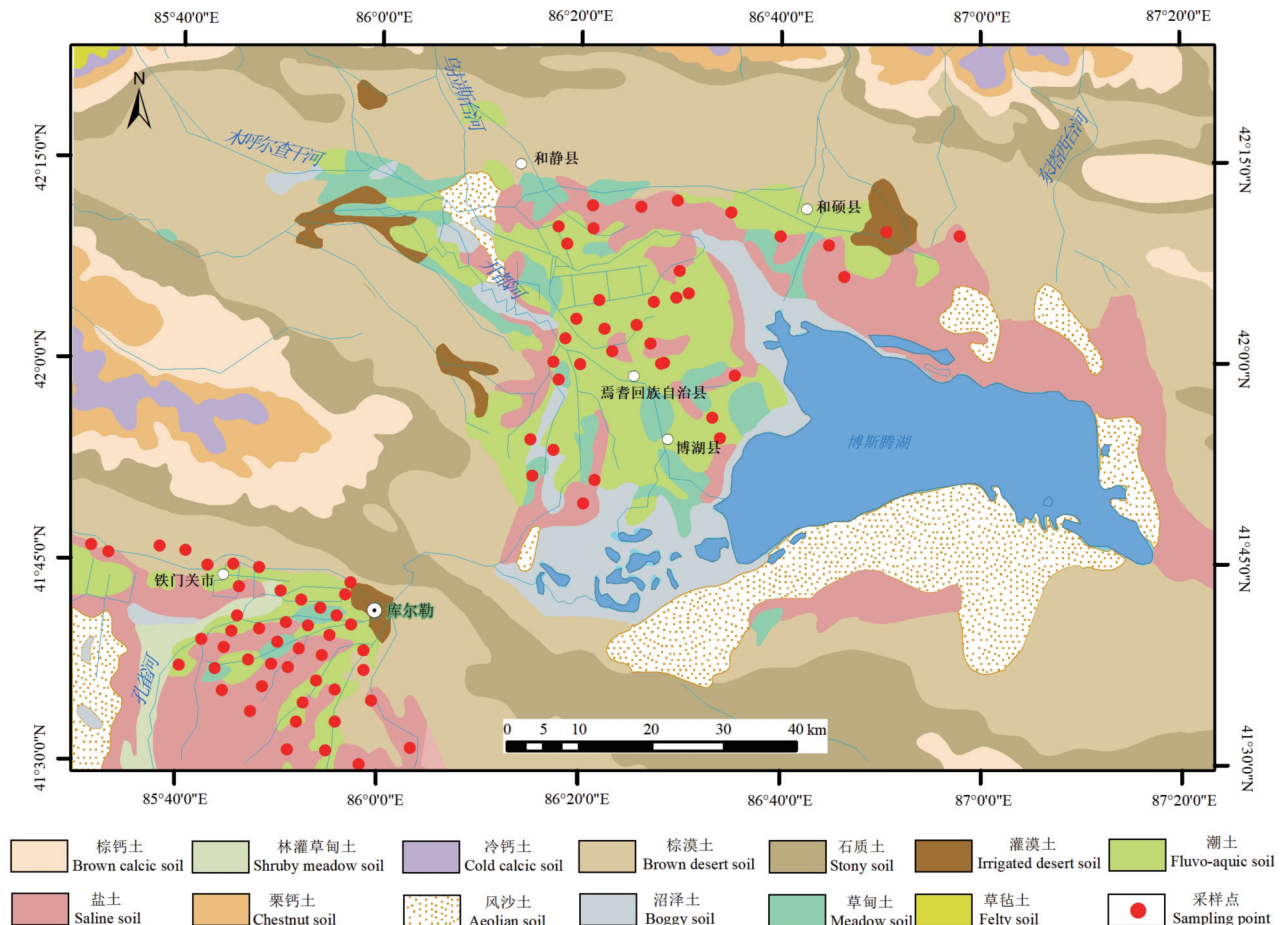


图 1 研究区采样点位图

Fig.1 Sampling sites of the study area

少雨,蒸发量大,日照时间长,年均日照约 3000 h,无霜期 175~210 d,年平均气温 8.5~11.5℃,年蒸发量 1730~3200 mm,年降雨量 40~93 mm,蒸发降雨比高达约 38:1。

研究区自南向北分为博湖凹陷、焉耆隆起、和静凹陷 3 个构造单元,区域上地层以出露古生界泥盆系、侏罗系和新生界古近系、新近系、第四系为特征,主要出露地层为第四系冲洪积物,侵入岩在研究区分布广泛,侵入时代分别为古元古代、泥盆纪、石炭纪,岩性主要包括斜长花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩。土壤类型主要为潮土、盐土、草甸土及棕漠土。研究区发育两条主要水系,上游为开都河,下游为孔雀河。研究区农业生产发达,主要农作物有辣椒、番茄、小麦、玉米、香梨等。

表层土壤样品采集方法按照中国地质调查局《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)的要求,采集表层 0~20 cm 的土壤,样品质量大于 500 g 的样品分成两份,一份 300 g 用于土壤矿物相分析,一份 200 g 用于土壤元素分析,共采集土壤样品 85 件。

2.2 样品测试

土壤元素指标由新疆维吾尔自治区地质矿产测试中心按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)的要求进行分析:土壤氮 N 测定采用凯氏法,土壤有机质(SOM)测定采用容量法,速效钾(AK)、有效磷(AP)采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES),Cu、Ni、Zn、Cd、Pb 测定采用电感耦合发射光谱法(ICP-OES),As 测定采用原子荧光光谱法(AFS)。氧化物 K₂O、Fe₂O₃、MnO、SiO₂、P₂O₅、TiO₂、Al₂O₃ 测定采用 X-射线荧光光谱法(XRF),具体检出限见表 1。

土壤样品指标的准确度通过国家标准物质控制,每 500 个样品号中密码插入 12 件标准物质进行分析,分别计算每种元素,每件标准物质,每次测定的测量值与标准值的对数差 $\Delta \lg C$,与表 2 中的准确度控制限比较,并计算合格率。pH 按绝对误差统计,酸性土壤标准物质绝对误差 ≤ 0.1 ,碱性土壤标准物质绝对误差 ≤ 0.2 。精密度的控制采用 4 个兼顾大部分元素高中低含量的土壤一级标准物质进行监控,以密码形式插入在每一分析批中(50 个号码),与样品一起分析,每批分析完成后,按每个标

表 1 元素测试方法及检出限

Table 1 Element testing methods and detection limits				
元素指标	单位	技术方法	规范规定检出限DL*	测试检出限
N	mg/kg	凯氏法	20	19.580
SOM	%	容量法	0.1	0.063
AK	mg/kg	ICP-AES	1.25	1.00
AP	mg/kg	ICP-AES	0.25	0.20
Cu	mg/kg	ICP-OES	1	0.952
Pb	mg/kg	ICP-OES	2	0.650
Ni	mg/kg	ICP-OES	2	0.744
Zn	mg/kg	ICP-OES	4	0.644
As	mg/kg	AFS	1	0.112
Cd	mg/kg	ICP-OES	0.03	0.002
pH	无量纲	电位法	0.10**	0.03
SiO ₂	%	XRF	0.1	0.05
K ₂ O	%	XRF	0.05	0.0008
Fe ₂ O ₃	%	XRF	0.05	0.03
CaO	%	XRF	0.05	0.03
MgO	%	XRF	0.05	0.03
Al ₂ O ₃	%	XRF	0.05	0.03
MnO	%	XRF	0.1	0.05
P ₂ O ₅	%	XRF	0.1	0.05
TiO ₂	%	XRF	0.1	0.05

注: *《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014); **为无量纲。

表 2 标准物质分析单次测定控制限

Table 2 Single determination control limit for standard substance analysis

含量范围	准确度	精密度
	$\Delta \lg C(\text{GBW}) = \lg C_i - \lg C_s $	$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg C_i - \lg C_s)^2}{4 - 1}}$
检出限三倍以内	≤ 0.12	0.17
检出限三倍以上	≤ 0.10	0.15
1%~5%	≤ 0.07	0.10
>5%	≤ 0.05	0.08

注: C_i 为每个GBW标准物质12次实测值的平均值; C_s 为GBW标准物质的标准值。

准物质计算测定值与监控样标准值的对数偏差($\Delta \lg C$),然后计算 4 个监控样的对数标准偏差(λ),用以衡量样品分析的精密度,并与表 2 中的精密度控制限比较,计算合格率。

土壤矿物相 X 射线衍射分析由中国地质调查局西安地质调查中心测试中心分析测试,样品先经连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠(DCB 法)进行脱铁处理,随后用 EDTA 二钠去除碳酸盐,双氧水去除有机质,处理自然晾干制备成定向片 N 片, N 片经乙二醇饱和处理后制成 E 片,经高温处理(450℃, 2 h)制成 T 片。测试仪器采用日本 D/max 5000 型转靶 X 射线衍射仪,测试条件: Cu-K α 辐

射, 电压 40 kV、电流 100 mA、扫描速度 4°/min、步长 0.02°、测量角度 N 片为 2.5°~15°、E 片为 2.5°~30°、T 片为 3°~14°。

2.3 数据处理

所得数据主要采用 SPSS24 进行统计分析和相关性分析, 使用 Origin2018 进行三角图、XRD 衍射图及散点图的绘制, 研究区采样点位图使用 ArcGIS10.8 完成, 黏土矿物的鉴定采用 MDI Jade5.0 与标准矿物参数进行匹配。

3 结果分析

3.1 土壤养分、重金属元素及氧化物含量特征

研究区土壤养分元素均值除速效钾(AK)外, 总体高于新疆土壤背景值(图 3), 其中 N、有效磷(AP)、有机质(SOM)相对富集, 而对比全国土壤背景值, 除速效钾(AK)富集外, 其余养分元素含量均低于全国土壤元素背景值(表 3; 侯青叶等, 2020)。研究区重金属元素含量均与新疆及全国土壤背景值相近(图 3), 表明研究区土壤暂无明显重金属污染风险。

依据《土地质量地球化学评价》(DZ/T 0295—2016)及《土壤质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018), 研究区养分元素氮 N, 有效磷 AP、速效钾 AK、土壤有机质 SOM 含量依次属于较缺乏、中等、较丰富、较缺乏水平; 重金属 As、Cd、Ni、Cu、Pb、Zn 含量均低于其风险筛选值, 表明研究区土壤暂无此类重金属污染风险, 相关方面的土地调查成果也表明该区域无重金属污染风险(赵禹等, 2022)。

土壤 Si、Al、Fe、Ca 等氧化物含量与成土母质化学成分、元素化学性质、存在状态、土壤发育时间及其所处的气候、地形、生物等多种因素有关, 同时, 也决定了土壤中黏土矿物的组成类型与占比。土壤氧化物组成显示(表 4), 研究区土壤氧化物组成以 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO、Fe₂O₃ 为主。硅铝率 Sa(Silica-Alumina Ratio)及化学蚀变指数 CIA (Chemical Index of Alteration)可以用于判断沉积物的风化程度, Sa 值越大, 风化程度越强; CIA 值在 50~60, 表示弱风化程度, 60~80 代表中等风化程度, 80~100 代表强风化程度(Fedo et al., 1995); 成分变异系数 ICV(Index of Compositional Variability)为风化过程易迁移的元素之和与不易迁移的铝元素的比值, 随着风化的不断进行, 长石遭受风化逐渐转化为黏土, ICV 值也逐渐降低, 非黏土的硅酸盐矿物具有比黏土更高的 ICV 值, 可用于比较表征黏土矿物相对于其余组分的含量情况, 当样品指标值 ICV>1.0 时, 表明样品黏土矿物含量较少, 成分成熟度较低, 受风化作用影响较小; 当 ICV<1.0 时, 表明样品黏土矿物含量较多, 经历强烈的风化作用(Cox et al., 1995)。

研究区土壤样品硅铝率 Sa 范围为 5.44~9.7, 均值 7.98, 化学蚀变指数 CIA 值范围 51.29~62.57, 均值 57.11, 上述化学风化参数表明研究区风化淋溶强度较弱。成分变异系数 ICV 值范围 1.09~3.69, 均值 1.88, 表明土壤沉积物中黏土矿物含量较少, 受到后续风化作用影响较小, 土壤成熟度较低。

3.2 土壤黏土矿物组成特征

X 射线衍射(X-Ray Diffraction, 简称 XRD)结

表 3 研究区土壤元素含量
Table 3 Soil element content in the study area

元素	样本数/个	均值	新疆土壤背景值	全国土壤背景值	富集系数K ₁	富集系数K ₂
N	85	947	680	1117	1.39	0.85
AP	85	19.6	17.9	27.4	1.09	0.72
AK	85	170.4	170.6	127.0	1.00	1.34
SOM	85	1.75	1.46	2.46	1.20	0.71
Ni	49	22.7	24.8	26.0	0.91	0.87
Cu	85	22.71	23.7	23.0	0.96	0.99
Pb	85	19.0	19.3	25.0	0.98	0.76
Zn	85	68.8	68.0	67.0	1.01	1.03
As	35	10.51	10.9	9.1	0.96	1.15
Cd	35	0.17	0.16	0.15	1.06	1.13

注: 全国土壤基准值、新疆背景值引自《中国土壤地球化学参数》(侯青叶等, 2020)。SOM单位为%, 其他为mg/kg; K₁=均值/新疆土壤背景值, K₂=均值/全国土壤背景值。

表 4 土壤主要氧化物含量 (%) 及化学参数

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	pH	Sa	CIA	ICV
样本数	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
最大值	64.5	14.66	5.99	17.43	7.46	3.35	2.75	0.64	0.1	0.73	9.19	9.7	62.57	3.69
最小值	38.78	7.96	2.46	6.18	1.54	1.70	1.17	0.088	0.052	0.35	8	5.44	51.29	1.09
均值	51.61	10.91	3.81	11.13	4.24	2.31	1.74	0.19	0.074	0.48	8.56	7.98	57.11	1.88
标准差	5.55	1.14	0.61	2.22	1.41	0.24	0.31	0.072	0.0078	0.056	0.29	0.89	2.23	0.47
变异系数	0.11	0.10	0.16	0.20	0.33	0.10	0.18	0.18	0.11	0.12	0.034	0.11	0.039	0.25

注：Sa=(SiO₂/Al₂O₃)；CIA=[(Al₂O₃/ (Al₂O₃+CaO* +Na₂O+K₂O)) ×100]；ICV=((Fe₂O₃ +MgO+CaO*+Na₂O+K₂O+MnO+TiO₂) / Al₂O₃)，CaO*为硅酸盐中CaO的摩尔含量。

果表明该区土壤矿物类型基本相同,以石英、方解石、斜长石为主,含少量钾长石、白云石、闪石。各样品 XRD 图谱也基本类似,衍射峰主要位于 1.42 nm、1.0 nm、0.71 nm、0.36 nm,本文以样品 TL0210 为例展示黏土矿物的鉴定结果(图 2),通过 MDI Jade5.0 根据 d 值与矿物标准数据进行匹配及不同处理衍射峰的变化,对黏土矿物类型进行定性分析,结果表明样品中含有伊/蒙混层矿物、伊利石、绿泥石以及高岭石。

定量计算结果(表 5)表明,开都河—孔雀河地区土壤中黏土矿物以伊/蒙混层矿物和伊利石为主,其中伊/蒙混层矿物含量在 15.0%~63.0%,均值为 45.1%;伊利石含量在 23.0%~62.0%,均值为 36.8%;以上两种矿物占到该区黏土矿物总量的 81.8%。其次为绿泥石,含量范围在 7.0%~21%,均值为 12.8%;高岭

石在该地区土壤黏土矿物中占比低,仅占 3.0%~9.0%,均值 5.5%。

4 讨论

4.1 黏土矿物的形成及演变规律

土壤黏土矿物是由成土母质经风化作用形成的,其类型及含量特征受母质影响较大(郑庆福等, 2010),而土壤成土母质与岩性密切关联。研究区成土母质主要为沙质黄土与河流冲—洪积物,区域沉积环境为河流沉积环境。同时,研究区周围出露主要岩性为花岗岩,成土母质主要源于花岗岩的风化产物,花岗岩中长石、云母类硅酸盐矿物进一步风化形成黏土矿物(陈涛等, 2003),因此,黏土矿物的形成具有相似的物质条件与沉积环境,从而导致该地区黏土矿物组成特征类似,而不同类型黏土矿物含量的变化主要是由于成岩过程中黏土矿物的转化和自生形成。

三端元分析法在黏土矿物的分类及成因研究中具有重要意义,其不仅能对黏土矿物变化进行横向对比,还能够分析成岩过程中黏土矿物的转化,已广泛应用于黏土矿物分析和演化研究(杨申谷, 2004)。以高岭石、伊利石、伊/蒙混层矿物为端元绘制三角端元图(图 3),结果可圈定三类黏土矿物

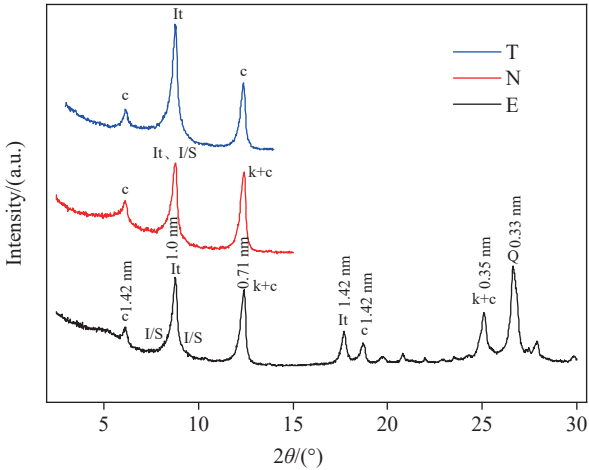


图 2 土壤黏土矿物 X-射线衍射图谱
N—自然片; E—乙二醇饱和片; T—高温片; C—绿泥石; K—高岭石;
It—伊利石; I/S—伊/蒙混层矿物; Q—石英
Fig.2 X-ray diffraction pattern of soil clay minerals
N—Natural sample; E—Ethylene glycol saturated sample; T—High-temperature sample; C—Chlorite, K—Kaolinite, It—Illite; I/S—Illite/smectite mixed-layer mineral; Q—Quartz

表 5 研究区土壤黏土矿物含量 (%)

Table 5 Soil clay mineral content in the study area (%)						
样本数/个		黏土矿物 总量	伊利石	伊/蒙混层 矿物	绿泥石	高岭石
最大值	85	30.1	62	63	21	9
最小值		5.2	23	15	7	3
均值		17.2	36.8	45.1	12.8	5.5
标准差		4.84	7.33	8.05	1.41	1.41
变异系数		0.28	0.20	0.18	0.11	0.26

注：黏土矿物总量为黏土矿物在土壤中的百分比,各类型黏土矿物含量为各自在黏土矿物总量中的百分比。

相对百分含量: 伊利石 25%~60%, 伊/蒙混层矿物 37%~75%, 高岭石低于 10%, 与中纬度干旱半干旱气候下形成的黏土矿物组合类似, 类似研究也表明中国西部地区由于气候干旱, 受化学风化的影响小, 受成岩作用的改造少, 黏土矿物组成主要受物源区岩性和矿物组成的控制, 不含高岭石或含高岭石很低(隆浩等, 2007)。其中, 伊利石为硅酸盐矿物风化初期的产物, 伊/蒙混层矿物为伊利石晶格层间钾离子不断淋失, 进一步风化的产物, 高岭石为强烈风化后的产物, 在三端元图中发现伊利石与伊/蒙混层矿物含量呈现相反的规律, 另一方面相关性分析结果表明伊利石与伊/蒙混层矿物呈极显著负相关, 而与高岭石、绿泥石不相关(表 6), 表明研究区黏土矿物间的演变主要发生在伊利石向伊/蒙混层矿物的转化, 而伊/蒙混层矿物与绿泥石和高岭石呈显著负相关关系, 表明伊/蒙混层矿物向绿泥石和高岭石的转变。

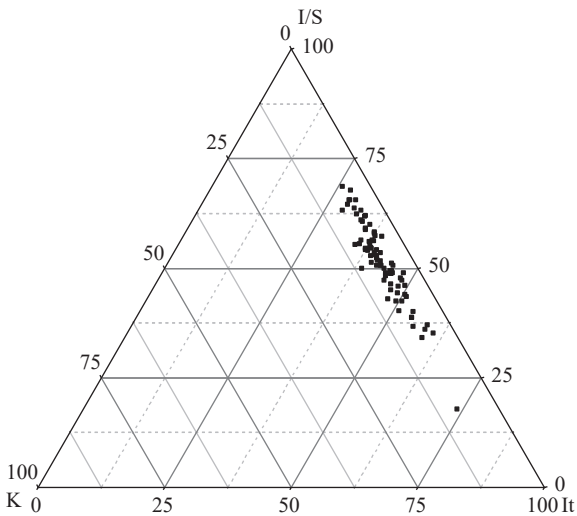


图 3 研究区黏土矿物三角图
K—高岭石; It—伊利石; I/S—伊/蒙混层矿物
Fig.3 Triangular plot of clay minerals in the study area
K—Kaolinite; It—Illite; I/S—Illite/smectite mixed-layer mineral

表 6 黏土矿物相关性分析					
Table 6 Correlation analysis of clay minerals					
	伊利石	伊/蒙混层矿物	绿泥石	高岭石	样本数
伊利石	1				
伊/蒙混层矿物	-0.904**	1			85
绿泥石	-0.007	-0.296**	1		
高岭石	-0.014	-0.385**	0.461**	1	

注: **表示 0.01 水平下相关性显著。

因此, 研究区的黏土矿物在低温干旱、弱碱性条件下, 由花岗岩中的长石、云母等铝硅酸盐矿物风化脱钾作用下形成了伊利石(陈涛等, 2003), 部分伊利石晶格层间钾离子继续淋失, 并且吸收 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} , 形成了伊/蒙混层矿物, 其中小部分混层矿物在富 Fe、Mg 环境下形成了绿泥石, 随着气候变化, 风化作用进行到酸性硅铝阶段, 碱金属淋失, 极少部分伊/蒙混层矿物进一步风化形成了高岭石。

4.2 黏土矿物对成土环境的指示

黏土矿物的含量、组合特征及矿物结晶度都不同程度上反映了沉积物形成时的气候及环境条件(刘东生, 2002)。因此, 可以根据黏土矿物的组成、含量、结晶程度等反映相关成土气候与环境条件。

不同类型黏土矿物形成于不同的气候环境条件, 通常, 高岭石形成于温暖潮湿的酸性环境, 是硅酸盐矿物强烈淋滤作用的产物。而在干旱寒冷的气候条件下, 风化淋滤作用较弱, 碱金属不易淋失, 从而易于形成伊利石、蒙脱石、伊利石/蒙脱石混层矿物和绿泥石(汤艳杰等, 2002)。Biscaye (1965)研究发现绿泥石在高纬度地区的土壤和沉积物中富集, 认为绿泥石和伊利石能够标识弱风化强度, 相反在低纬度地区, 由于风化淋滤作用较强, 易于形成高岭石, 因此高岭石是低纬度地区的典型黏土矿物。研究区黏土矿物组合类型为伊利石-伊/蒙混层矿物-绿泥石, 由上述分析可知, 该类型的黏土矿物组合反映了低温、干旱、风化淋溶弱的成土期环境, 同时该区的化学蚀变指数 CIA 值(均值 57.11)与成分变异指数 ICV 值(均值 1.88), 表明了研究区较弱的风化作用以及土壤中黏土矿物含量较少, 成分成熟度较低的特征(李绪龙等, 2022)。

矿物结晶度反映其内部结构有序度, 这种变化与气候环境密切相关, 因此, 黏土矿物的结晶度具有重要的环境意义, 可以作为气候变化的指示计(鲁春霞, 1997)。伊利石结晶度是反映气候变化的灵敏指标, 目前得到广泛应用。一般认为, 在高温潮湿环境下, 由于强烈的水解作用, 会导致伊利石结晶度变差, 而在干燥寒冷的气候条件下, 伊利石能够保留较好的结晶度, 因此, 根据伊利石的结晶度可以判断沉积物形成的环境及气候条件, 目前该指标已经广泛应用于环境与气候变化的研究中。Kubler (1964)提出了用伊利石 1 nm 衍射峰的半高宽来表

示伊利石的结晶度,称为 Kubler 指数,该指数越大,伊利石结晶度越差。据此,笔者使用 Kubler 指数统计了研究区伊利石的结晶度(IC)值,其变化范围 0.35~0.62,平均值 0.44。依据 Wefer et al.(1996)对 IC 值的分类:IC<0.4,代表结晶度非常高;0.4<IC<0.6,代表结晶度高;IC>0.8,代表结晶度差。因此,研究区伊利石结晶度(IC)值属于高结晶度范围,高结晶度反映了研究区成土期低温干旱的气候条件。

4.3 黏土矿物对土壤养分、重金属元素的影响

4.3.1 对土壤养分元素的影响

对研究区黏土矿物与土壤肥力指标有机质、全氮、速效钾、有效磷,进行相关性分析,结果(表 7)显示黏土矿物总量与土壤肥力指标均呈现不同程度的正相关关系,表明土壤黏土矿物能够促进土壤养分的积累,其中与有机质、全氮、速效钾、有效磷相关系数分别为 0.424、0.530、0.355、0.215,按相关性顺序为全氮>有机质>速效钾>有效磷,其中与全氮及有机质的相关性较强,这主要受控于黏土矿物与养分元素之间的吸附方式及结合能力。通常,黏土矿物能以物理和化学吸附的方式与有机质结合,结合位置包括黏土矿物表面以及内部层间域。其中物理吸附以分子间引力为主,有机质一般存在于黏土矿物表面的超微孔隙中,而化学吸附通过离子替代或水解作用而导致剩余电荷形成的化学键而吸附有机质(蔡进功等,2009),存在多种结合方式,如配位交换、阳离子桥、水桥、离子偶极和阴阳离子交换等(Mortland, 1970),由于这种物理化学吸附性,故黏土矿物通常表现出与有机质的正相关关系。研究表明,土壤全氮中 90% 以上为有机氮,而

有机氮主要存在于土壤有机质中(Schulten and Schnitzer, 1997)。黏土矿物对有机质的吸附作用进而也会引起土壤有机氮的吸附累积,因此,黏土矿物与土壤全氮之间表现出显著正相关关系。土壤中钾元素以结构钾、交换性钾和水溶性钾三种形态存在,其中后两者称为速效钾,而被黏土矿物固定的钾称为缓效钾(梁成华等,2002),然而,当速效钾被植物吸收或风化淋失,一部分缓效钾可以释放出来形成速效钾,故黏土矿物虽然与土壤速效钾无直接关联,但其固定的钾可以成为土壤速效钾的来源,因此,黏土矿物与土壤速效钾呈现正相关关系。此外,黏土矿物与土壤有效磷相关性较低,土壤有效磷是指土壤中可被植物吸收的磷,包括全部水溶性磷、部分吸附态磷及有机磷。土壤环境中磷多以磷酸盐的形式存在,通常,磷酸盐的吸附量主要取决于其所吸附矿物的正电荷数量,研究表明,黏土矿物与磷酸盐的结合能力远低于铁、铝氧化物(任娟,2021)。因此,有学者认为黏土矿物在土壤中与磷酸盐结合的组分可以忽略不计(Manning and Goldberg, 1996)。此外,研究区 pH 均值为 8.56,为弱碱性土壤环境,磷酸盐易与钙结合,形成难溶性的磷酸钙(王敬国,2017)。因此,吸附在黏土矿物表面的磷含量十分有限,导致黏土矿物与土壤有效磷之间的相关性较弱。

虽然黏土矿物总量与土壤养分元素呈现正相关关系(图 4),但各单类型黏土矿物与土壤元素之间的相关性差异较大,其中,伊/蒙混层矿物与土壤肥力指标的相关性与黏土矿物总量一致,这表明伊/蒙混层矿物在黏土矿物吸附养分元素的过程中起主导作用,这可能有两方面原因,一方面,研究区伊/

表 7 黏土矿物与土壤元素的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of clay minerals with soil elements

元素分类	元素	黏土矿物总量	伊利石	伊/蒙混层矿物	高岭石	绿泥石
养分元素	N	0.530**	-0.418	0.483**	-0.152	-0.258
	AP	0.215*	-0.027	0.055	-0.189	-0.028
	AK	0.355**	-0.314	0.393**	-0.088	-0.293
	SOM	0.424**	-0.403	0.481**	-0.077	-0.320
重金属元素	Ni	0.664**	-0.343	0.288*	0.246	0.031
	Cu	0.765**	-0.191	0.173	-0.122	0.032
	Pb	0.501**	-0.081	0.060	-0.180	0.144
	As	0.491**	-0.016	-0.158	-0.146	0.246
	Cd	0.501**	-0.081	0.092	0.055	-0.089
	Zn	0.666**	-0.169	0.193	-0.146	-0.077

注: **和*分别表示0.01水平和0.05水平下显著。

蒙混层矿物含量较高, 达到 45.05%, 能够吸附足量的养分物质, 另一方面, 伊/蒙混层矿物中蒙脱石通常由于极大的比表面积, 以及更多的表面活性基团 (Uddin, 2018), 从而表现出对养分物质的较强的吸附能力。而其他单类型黏土矿物与土壤养分元素的相关性较差, 这可能是由于其余单类型黏土矿物的含量水平较低及吸附能力较弱, 不足以吸附足量养分元素, 导致两者的相关性较差。

4.3.2 对重金属元素的影响

相关性分析结果表明黏土矿物总量与土壤重金属元素均呈现不同程度的正相关关系 (图 5), 其中与镍、铜、铅、锌、砷、镉相关系数分别为 0.664、

0.765、0.501、0.666、0.491、0.501 (表 7), 表明黏土矿物能够有效吸附土壤重金属。研究表明, 由于黏土矿物比表面积大、表面负电荷密度高及活性基团丰富等特点, 土壤中黏土矿物是土壤吸附固定重金属的重要组分。黏土矿物的吸附性可分为物理吸附、化学吸附与离子交换吸附三种类型, 物理吸附是指黏土矿物与吸附物质间的分子引力产生的吸附, 包括氢键产生的吸附; 化学吸附是指黏土矿物与吸附物质间的化学键力而产生的吸附; 离子交换性吸附是指由于黏土矿物表面存在不饱和电荷, 为了达到电荷平衡而吸附异号的电荷而产生的离子交换作用 (杭小帅等, 2007)。通常, 重金属可通过专

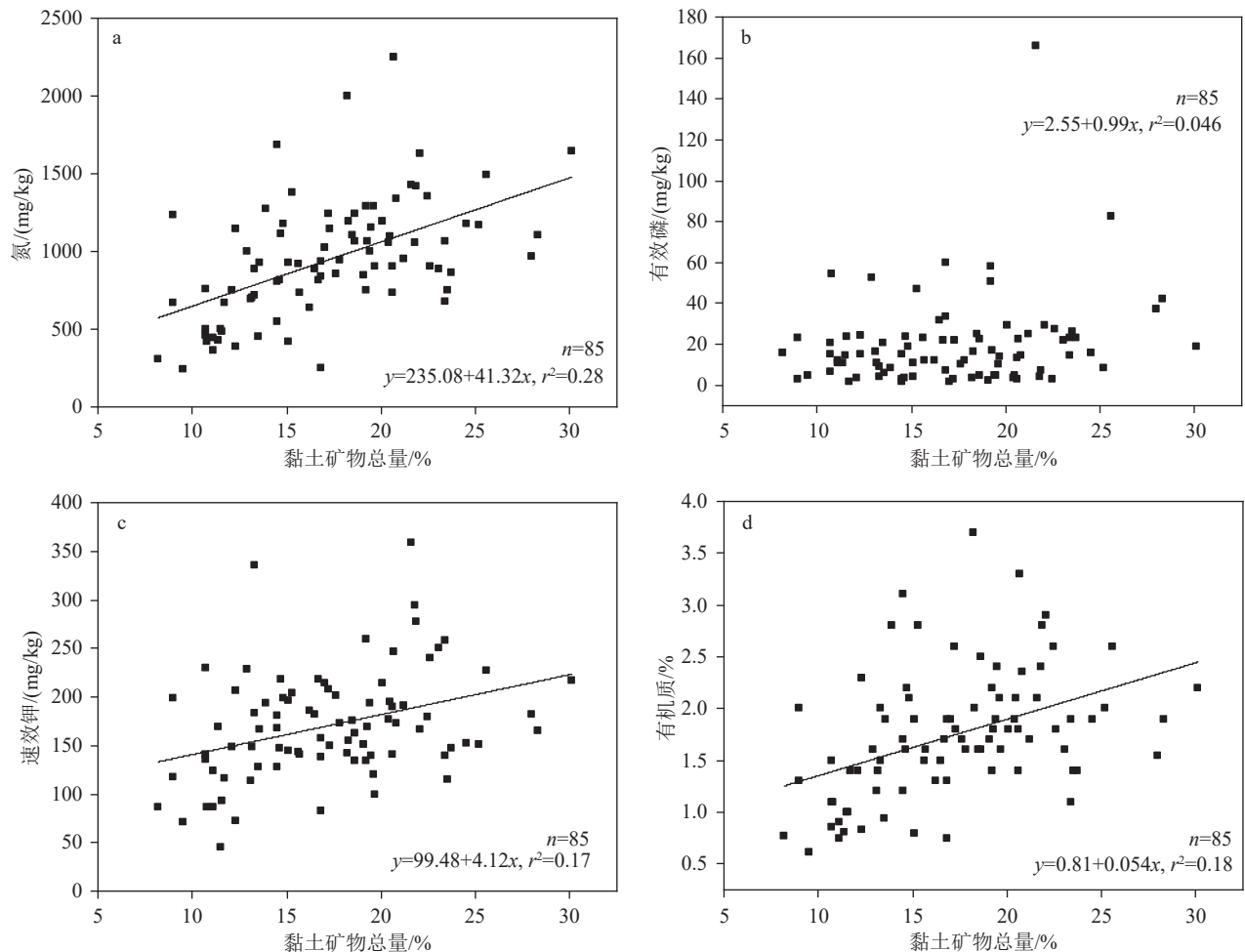


图 4 黏土矿物总量与土壤养分的相关性拟合

a—黏土矿物总量与氮相关性拟合; b—黏土矿物总量与有效磷相关性拟合;

c—黏土矿物总量与速效钾相关性拟合; d—黏土矿物总量与有机质相关性拟合

Fig.4 Correlation fitting between total clay minerals and soil nutrient elements

a—Correlation fitting between total clay minerals and nitrogen; b—Correlation fitting between total clay minerals and available phosphorus;

c—Correlation fitting between total clay minerals and available potassium; d—Correlation fitting between total clay minerals and organic matter

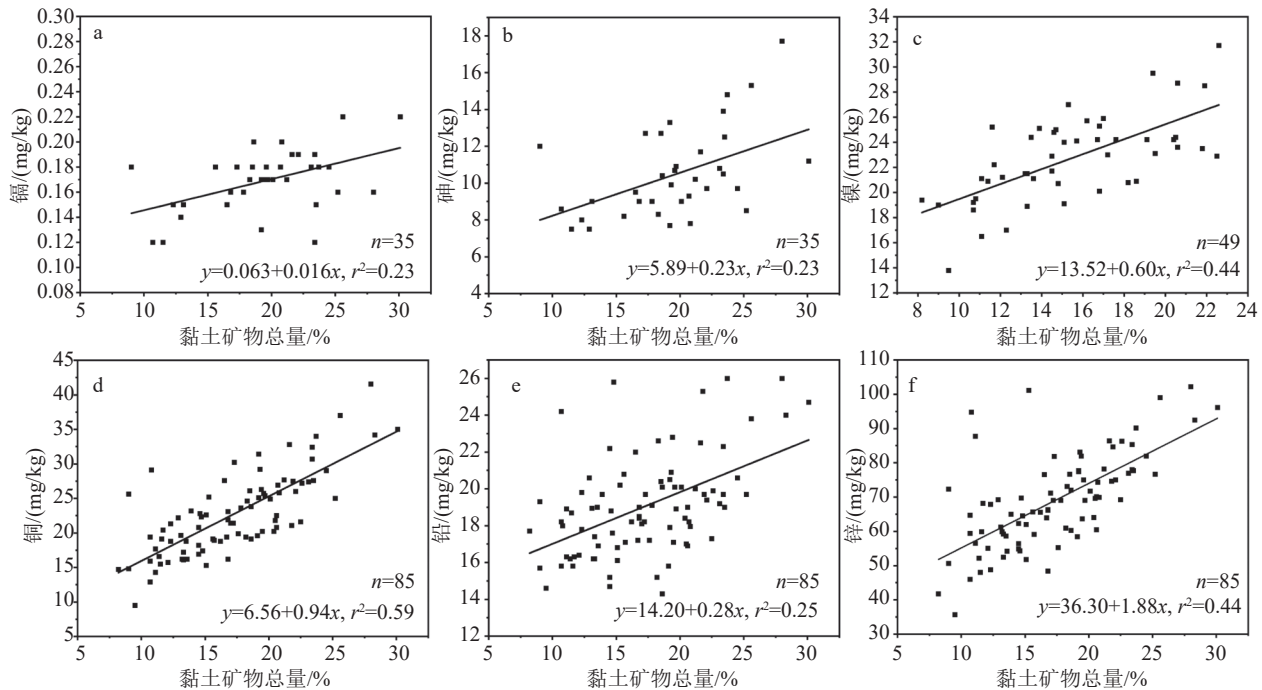


图5 黏土矿物总量与土壤重金属间的相关性拟合

a—黏土矿物总量与镉元素相关性拟合; b—黏土矿物总量与砷相关性拟合; c—黏土矿物总量与镍相关性拟合;
d—黏土矿物总量与铜相关性拟合; e—黏土矿物总量与铅相关性拟合; f—黏土矿物总量与锌相关性拟合

Fig.5 Correlation fitting between total clay minerals and heavy metal elements

a—Correlation fitting between total clay minerals and cadmium; b—Correlation fitting between total clay minerals and arsenic; c—Correlation fitting between total clay minerals and nickel; d—Correlation fitting between total clay minerals and copper; e—Correlation fitting between total clay minerals and lead; f—Correlation fitting between total clay minerals and lead

性吸附和非专性吸附两种方式结合在黏土矿物表面。其中,非专性吸附是一种较弱的吸附作用,一般发生在矿物表面的永久电荷位点,通过静电作用形成外圈络合物,而专性吸附相对较强,黏土矿物表面存在羟基化活性基团 $\equiv\text{SOH}$ (包括 Si-OH 、 Al-OH),通常吸附质与其发生表面配位反应,并形成内圈络合物(杜辉辉,2017),例如, Pb^{2+} 在高岭石表面的 Al-OH 形成内圈络合物(Collins et al., 1999), Ni^{2+} 在蒙脱石表面形成共沉淀、外圈络合物及内圈络合物(Tan et al., 2011)。Du et al. (1997)在研究中发现 Cu 离子在伊利石表面形成单齿络合物 $\equiv\text{SOCu}^+$ 、 $\equiv\text{SOCuOH}$,多齿络合物 $\equiv\text{SOCu}_2(\text{OH})_2^+$ 以及表面沉淀 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 、 $\equiv\text{SOCu}_2(\text{OH})_3(\text{SP})$ 。Gier and Johns (2000)发现 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 在水云母和伊利石上形成 $\text{Cu}(\text{OH})^+$ 和 $\text{Zn}(\text{OH})^+$ 羟基络合物。

造成黏土矿物吸附重金属含量差异的因素主要包括pH、黏土矿物类型、元素性质、温度等因素(何宏平等,1999; Gupta and Bhattacharyya, 2008;

Shahmohammadi-Kalalagh et al., 2010; Eloussaief et al., 2013)。通常重金属离子的电价越高,半径越小,黏土矿物对其吸附性越强。戴树桂等(2001)研究表明,土壤黏土矿物的吸附能力与黏土矿物种类相关,研究区各种黏土矿物对重金属的吸附强弱顺序为:蒙脱石>伊利石>绿泥石>高岭石,一般来说2:1型黏土矿物吸附能力更强。本研究中黏土矿物为2:1型伊利石、伊/蒙混层矿物、绿泥石及1:1型高岭石组成的混合黏土矿物体系,其中以2:1型黏土矿物为主,与研究区土壤重金属表现出显著正相关关系,按相关性顺序为 $\text{Cu}>\text{Zn}>\text{Ni}>\text{Pb}=\text{Cd}>\text{As}$,这主要受控于重金属离子的电价、离子浓度与黏土矿物类型,该顺序与何宏平等(1999)关于蒙脱石对重金属离子吸附的研究结果类似。另一方面,相关研究表明绿泥石和高岭石对As的吸附能力比其他类型黏土矿物高25~35倍(Lin and Puls, 2000),而研究区黏土矿物中绿泥石、高岭石含量较低,因此导致黏土矿物与As相关性相对较低。综

合来看, 绿洲区黏土矿物通过吸附作用固定土壤重金属。此外, 各单类型的黏土矿物均与土壤重金属元素相关性差或不相关, 这也可能是由于单类型黏土矿物含量较低, 吸附重金属有限, 从而导致两者相关性差, 而这些黏土矿物混合在一起能够表现出对重金属的良好吸附能力(图 5)。

5 结 论

(1) 通过对开都河—孔雀河流域绿洲区农田表层土壤矿物进行 X-射线衍射分析, 发现该区黏土矿物类型主要为 2:1 型的伊利石、伊/蒙混层矿物和绿泥石, 含少量的高岭石。黏土矿物平均含量顺序为: 伊/蒙混层矿物(45.05%)>伊利石(36.76%)>绿泥石(12.75%)>高岭石(5.50%), 其中 2:1 型黏土矿物约占 95%, 该区黏土矿物组合类型为伊利石-伊/蒙混层矿物-绿泥石型。

(2) 开都河—孔雀河流域农田土壤黏土矿物的物源为花岗岩中的硅酸盐矿物, 其演变规律为伊利石→伊/蒙混层矿物→绿泥石、高岭石。研究区伊利石结晶度 IC 值(均值 0.44), 化学蚀变指数 CIA 值(均值 57.11)及成分变异系数 ICV 值(均值 1.88), 上述参数及研究区黏土矿物组合类型共同反映了该区低温、干旱的成土环境。

(3) 开都河—孔雀河流域绿洲农田区土壤黏土矿物总量与土壤养分(N、AP、AK、SOM)呈现正相关关系, 与重金属元素(Ni、Cu、Pb、Zn、As、Cd)呈现显著正相关关系, 表明黏土矿物对土壤养分元素的吸附, 从而提升土壤养分元素水平, 同时也能够通过吸附作用固定土壤重金属元素, 降低其农业风险。

References

- Bergaya F, Lagaly G. 2006. General introduction: Clays, clay minerals, and clay science[J]. *Developments in Clay Science*, 1: 1–18.
- Biscaye P E. 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7): 803–832.
- Cai Jingong, Lu Longfei, Ding Fei, Fan Fu. 2009. Significance of interaction between soluble organic matter and clay minerals in muddy source rocks[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 37(12): 1679–1684 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, Wang Hemian. 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 416–420 (in Chinese with English abstract).
- Celis R, Hermosin M C, Cornejo J. 2000. Heavy metal adsorption by functionalized clays[J]. *Environmental Science & Technology*, 34(21): 4593–4599.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940.
- Crow S E, Swanston C W, Lajtha K, Brooks J R, Keirstead H. 2007. Density fractionation of forest soils: Methodological questions and interpretation of incubation results and turnover time in an ecosystem context[J]. *Biogeochemistry*, 85: 69–90.
- Collins C R, Ragnarsdottir K V, Sherman D M. 1999. Effect of inorganic and organic ligands on the mechanism of cadmium sorption to goethite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 2989–3002.
- Dai Shugui, Liu Guangliang, Qian Yun, Sun Yubao. 2001. Development of research on soil multimedia environmental pollution[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 10(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Deconinck J F, Blanc-Valleron M, Rouchy J, Camoin G, Badaut-Trauth D. 2000. Palaeoenvironmental and diagenetic control of the mineralogy of Upper Cretaceous–Lower Tertiary deposits of the Central Palaeo-Andean basin of Bolivia (Potosi area)[J]. *Sedimentary Geology*, 132(3): 263–278.
- Du Q, Sun Z, Forsling W. 1997. Surface complexation in natural particle suspensions[J]. *International Poster Journal of Science & Technology*, 2(2): 70–82.
- Du Huihui. 2017. Molecular Binding Mechanisms of Cadmium and Lead at the Mineral-organic Interface[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 1–125 (in Chinese with English abstract).
- Eloussaief M, Hamza W, Kallel N, Benzina M. 2013. Wastewaters decontamination: Mechanisms of Pb(II), Zn(II), and Cd(II) competitive adsorption on tunisian smectite in single and multi-solute systems[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 32(2): 229–229.
- Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921–924.
- Gier S, Johns W D. 2000. Heavy metal-adsorption on micas and clay minerals studied by X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Applied Clay Science*, 16(5/6): 289–299.
- Gupta S S, Bhattacharyya K G. 2008. Immobilization of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) ions on kaolinite and montmorillonite surfaces from aqueous medium[J]. *Journal of Environmental Management*, 87(1): 46–58.
- Hou Qinye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin, Zhou Guohua. 2020. Soil Geochemical Elements Parameters in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 75–135(in Chinese).

- Chinese with English abstract).
- Hang Xiaoshuai, Zhou Jianmin, Wang Huoyan, Shen Peiyou. 2007. Remediation of heavy metal contaminated soils using clay minerals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1(9): 113–120 (in Chinese with English abstract).
- He Hongping, Guo Longgao, Xie Xiande, Peng Jinlian. 1999. Experimental studies on the selective adsorption of Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} ions on montmorillonite, illite and kaolinite and the influence of medium conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(2): 231–235 (in Chinese with English abstract).
- Keller W. 1970. Environmental aspects of clay minerals[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 40(3): 788–813.
- Kubler B. 1964. Les argiles, indicateurs de métamorphisme[J]. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 19: 1093–1112.
- Li Xulong, Zhang Xia, Lin Chunming, Huang Shuya, Li Xin. 2022. Overview of the application and prospect of common chemical weathering indices[J]. *Geological Journal of China Universities*, 28(1): 51 (in Chinese with English abstract).
- Liang Chenghua, Wei Liping, Luo Lei. 2002. Advance in research on mechanisms of potassium releasing and fixing in soils[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(5): 679 (in Chinese with English abstract).
- Lin Z, Puls R W. 2000. Adsorption, desorption and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging process[J]. *Environmental Geology*, 39: 753–759.
- Liu Dongsheng. 2002. Loess and environment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 22(4): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- Long Hao, Wang Chenhua, Liu Yongping, Ma Haizhou. 2007. Application of clay minerals in paleoenvironment research[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 15(2): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chunxia. 1997. Clay minerals as indicators of paleoenvironment[J]. *Journal of Desert Research*, 17(4): 456–460 (in Chinese with English abstract).
- Manning B A, Goldberg S. 1996. Modeling arsenate competitive adsorption on kaolinite, montmorillonite and illite[J]. *Clays and Clay Minerals*, 44: 609–623.
- Mortland M. 1970. Clay–organic complexes and interactions[J]. *Advances in Agronomy*, 22: 75–117.
- Niu Fangpeng, Li Xinguo, Jin Wangui. 2020. Characteristics of soil salinity in the western lakeside oasis of Bosten Lake[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (3): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Ren Juan. 2021. Coupling Response of Iron Oxide Phase Differentiation and Phosphorus in Soils with Multi–environmental Gradients[D]. Chongqing: Southwest University, 1–136 (in Chinese with English abstract).
- Shahmohammadi–Kalalagh S, Babazadeh H, Nazemi A H, Manshouri M. 2010. Isotherm and kinetic studies on adsorption of Pb, Zn and Cu by kaolinite[J]. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 9: 243–255.
- Shi Huanzhi, Li Fuchun, Li Xuhui, Wu Feng, Luo Xupeng, Li Xuelin, Jin Zhangdong. 2011. Distribution of organic carbon in the Luoichuan loess/paleosol and its relationship with clay minerals[J]. *China Geology*, 38(5): 1355–1362 (in Chinese with English abstract).
- Schulten H R, Schnitzer M. 1997. The chemistry of soil organic nitrogen: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 26: 1–15.
- Singer A. 1984. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments—a review[J]. *Earth–Science Reviews*, 21(4): 251–293.
- Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. 2002. Environment significance of clay minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337–344 (in Chinese with English abstract).
- Thiry M. 2000. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: An outlook from the continental origin[J]. *Earth–Science Reviews*, 49(1): 201–221.
- Tan X, Hu J, Montavon G, Wang X. 2011. Sorption speciation of nickel(II) onto Ca–montmorillonite: Batch, EXAFS techniques and modeling[J]. *Dalton Transactions*. 40: 10953–10960.
- Uddin F. 2018. Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization[M]. London, UK: Intech Open, 81–87.
- Uddin M K. 2017. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade[J]. *Chemical Engineering Journal*, 308: 438–462.
- Velde B B, Meunier A. 2008. The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media, 105–120.
- Wang Jingguo. 2017. Biogeochemistry: Matter Cycles and Soil Processes[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 82–92 (in Chinese with English abstract).
- Wefer G, Berger W H, Siedler G, Diekmann B, Petsechick R. 1996. Clay mineral fluctuations in Late Quaternary sediments of the southeastern South Atlantic: Implications for past changes of deep water advection[J]. *The South Atlantic: Present and Past Circulation*, 621–644.
- Yang Shengu. 2004. Three unit clay mineral analytical method and its application[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 26(2): 26–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liwen, Ji Xibin. 2010. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO–56 dual crop coefficient approach—a case study of the maize field in an oasis in the middlestream of the Heihe River Basin in Northwest China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 43(19): 4016–4026 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yu, Zhao Hansen, Liu Tuo, Bai Jin, Wang Lei, Liang Nan, Wang Peng, Yang Shengfei, Wei Jinping, Li Wengming, Zeng Xianhong, Zhang Zhuan, Han Haihui, Zhao Jun, Chen Zhenyu. 2022. Progresses and main achievements of geochemical survey of land quality in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 55(3): 140–154 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qingfu, Liu Ting, Zhao Lanpo, Feng Jun, Wang Hongbin, Li

Chunlin. 2010. Spatial variation and evolution mechanism of clay minerals composition in agric horizon of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 47(4): 734–746 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡进功, 卢龙飞, 丁飞, 樊馥. 2009. 烃源岩中黏土与可溶有机质相互作用研究展望[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 37(12): 1679–1684.
- 陈涛, 王欢, 张祖青, 王河锦. 2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(4): 416–420.
- 戴树桂, 刘广良, 钱芸, 孙玉宝. 2001. 土壤多介质环境污染研究进展[J]. *土壤与环境*, 10(1): 1–5.
- 杜辉辉. 2017. Cd(II)、Pb(II) 在土壤矿物-有机互作界面的分子结合机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 1–125.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成杭新, 周国华. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 75–135.
- 杭小帅, 周健民, 王火焰, 沈培友. 2007. 粘土矿物修复重金属污染土壤[J]. *环境工程学报*, 1(9): 113–120.
- 何宏平, 郭龙皋, 谢先德, 彭金莲. 1999. 蒙脱石等粘土矿物对重金属离子吸附选择性的实验研究[J]. *矿物学报*, 19(2): 231–235.
- 李绪龙, 张霞, 林春明, 李鑫. 2022. 常用化学风化指标综述: 应用与展望[J]. *高校地质学报*, 28(1): 51.
- 梁成华, 魏丽萍, 罗磊. 2002. 土壤固钾与释钾机制研究进展[J]. *地球科学进展*, 17(5): 679.
- 刘东生. 2002. 黄土与环境[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*,

22(4):7–12.

- 隆浩, 王晨华, 刘勇平, 马海洲. 2007. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 15(2): 21–25.
- 鲁春霞. 1997. 粘土矿物在古环境研究中的指示作用[J]. *中国沙漠*, 17(4): 456–460.
- 牛芳鹏, 李新国, 靳万贵. 2020. 博斯腾湖西岸湖滨绿洲土壤盐分特征[J]. *中国土壤与肥料*, (3): 8–15.
- 任娟. 2021. 土壤多环境梯度铁氧化物相分异与磷的耦合响应研究[D]. 重庆: 西南大学, 1–136.
- 师焕芝, 李福春, 李旭辉, 吴枫, 罗旭鹏, 李学林, 金章东. 2011. 洛川黄土/古土壤中有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. *中国地质*, 38(5): 1355–1362.
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义[J]. *地学前缘*, 9(2): 337–344.
- 王敬国. 2017. 生物地球化学: 物质循环与土壤过程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 82–92.
- 杨申谷. 2004. 三端元粘土矿物分析方法及应用[J]. *江汉石油学院学报*, 26(2): 26–28.
- 赵丽雯, 吉喜斌. 2010. 基于 FAO-56 双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例[J]. *中国农业科学*, 43(19): 4016–4026.
- 赵禹, 赵寒森, 刘拓, 白金, 王磊, 梁楠, 王鹏, 杨生飞, 魏锦萍, 李文明, 曾宪红, 张转, 韩海辉, 赵君, 陈振宇. 2022. 西北地区土地质量地球化学调查进展与主要成果[J]. *西北地质*, 55(3): 140–154.
- 郑庆福, 刘艇, 赵兰坡, 冯君, 王鸿斌, 李春林. 2010. 东北黑土耕层土壤黏粒矿物组成的区域差异及其演化[J]. *土壤学报*, 47(4): 734–746.