Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2025, 15(8), 1202-1209
Published Online August 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2025.158112

Hans汉斯

济阳坳陷不整合结构划分及矿物组合特征

齐陆宁，滕　飞，胡　奇，黄　文

中国石化胜利油田分公司海洋采油厂，山东　东营

收稿日期：2025年6月26日；录用日期：2025年8月12日；发布日期：2025年8月20日

摘　要

本文针对济阳坳陷的不整合结构层开展了系统研究，综合运用取心观察、矿物学分析、元素地球化学分析以及镜下鉴定等方法，识别出三种主要的不整合结构类型：I型粘土风化壳不整合、II型半风化岩石不整合和III型无风化壳不整合。研究显示，各个风化带结构层的矿物成分及其元素地球化学特征均表现出明显差异。随着风化过程的加强，岩石中较为稳定的矿物，例如石英和黏土，其比例逐渐上升。在强烈风化影响下的黏土层中，高岭石等黏土矿物的比例显著超过半风化岩层，与此同时，长石等不稳定矿物的含量大幅下降。

关键词

济阳坳陷，不整合结构，地层不整合，风化壳，风化特征

Classification of Unconformity and Mineral Assemblage Characteristics in Jiyang Depression

Luning Qi, Fei Teng, Qi Hu, Wen Huang

Offshore Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying Shandong

Received: Jun. 26th, 2025; accepted: Aug. 12th, 2025; published: Aug. 20th, 2025

Abstract

In this study, the unconformities within the Jiyang Depression are systematically investigated, and three primary types of unconformities are identified through core observation, mineralogical analysis, elemental geochemical analysis, and microscopic identification: Type I clay weathered crust unconformities, Type II semi-weathered rock unconformities, and Type III non-weathered crust unconformities. It is observed that the structural layers across different weathering zones exhibit significant

文章引用: 齐陆宁, 滕飞, 胡奇, 黄文. 济阳坳陷不整合结构划分及矿物组合特征[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1202-1209. DOI: 10.12677/ag.2025.158112

variations in mineralogical composition and elemental geochemistry. As the degree of weathering intensifies, the relative abundance of stable minerals (such as quartz and clay minerals) in the rock progressively increases. In the most intensely weathered clay layers, the concentration of clay minerals (particularly kaolinite) is markedly higher compared to semi-weathered rocks, whereas the content of unstable minerals such as feldspar is substantially reduced.

Keywords

Jiyang Depression, Unconformity, A Geological Interruption or Discontinuity, Weathered Crust, Characteristics of Material Erosion and Breakdown

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

地层中不整合现象的理解和研究已有悠久历史。早在 1788 年，James Hutton 就意识到了地层记录中不整合及时间间隔的重要性[1]。在 1980 年，Bates 和 Jackson 综合了此前的研究，并提出了一个在当今依然广泛认可的不整合定义[2]。该定义突出了不整合的形成机制，描述了两组地层之间的不连续接触往往表现出不平行的关系。随着对油气勘探研究的不断深入，不整合控藏已成为一个引人注目的领域。特别是在微观结构方面，研究者如付广(2000)、吴孔友(2003)以及张建林(2005)等已经认识到，不整合不仅是一个简单的界面，而是与其上下地层共同构成了一个独特的地质单元，形成一个特殊的油气运移和储积系统[3]-[5]。

为提高研究的代表性与可比性，本文扩大了研究样品与井数范围，涵盖了济阳坳陷中东部、西南部及中部的代表性井点，共采集 32 口井的 126 件样品，形成了覆盖I型、II型及III型三类不整合构造的系统性数据。表 1 中列出了采样清单，包括井号、层位、取样深度、岩性描述、结构类型等内容；文中统计了各类不整合的井中元素频率分布、采样样本数量。基于地质剖面与 GIS 平台，本文还构建了济阳坳陷内三类不整合结构的平面展布图，对其频率及分布趋势进行了定量可视化分析。

在地质学中，典型的不整合地质体在垂直剖面上能够被细化为多个不同层次。这些层次包括：底部的沉积层(例如砾岩)位于不整合面上，顶端是不整合面的风化黏土层，接着是风化黏土层下的半风化岩层，最底层是新鲜的未风化岩石。这些层级共同组成了一个垂直的多层次结构截面。受侵蚀时间、气候、地形特征、地质活动和岩石性质多样性的影响，不整合面下方的结构层可能缺乏风化粘土层，甚至失去半风化岩石层，结果导致出现不同的结构变化(来源：隋风贵等) [6]。由于结构层在油气运移和聚集中的关键作用，引起了众多学者的大量研究。在深入研究现代风化壳后，来自土壤学、地貌学和工程地质学的专家们提出了多种分类方法，并进行了详细的学术讨论。关于花岗岩风化剖面的分层研究，Ehle 提出了三带划分方案：表层风化土壤(A + B 带)和下部风化基岩(C 带)。后续学者 Tandarich 等进一步细化了 C 带的分类体系，将其划分为不同风化程度的亚层。地貌学专家对风化壳进行垂直和水平的分带划分。Little 将风化壳细分为以下几类：轻度风化岩、适度风化岩、剧烈风化岩、全风化岩，以及留下的残积土[7]。目前，对含油气盆地古风化壳结构特征的探索多处于定性推测阶段，依托数据的定量分析研究相对稀缺。本文在借鉴前人研究成果的基础上，通过岩心观察、矿物分析、元素含量检测和显微镜观察等手段，对济阳坳陷的典型不整合结构进行了研究，并对各个结构层的特征进行了相关分析。

2. 不整合结构划分

通常，理想的不整合会展示出三层形态。根据吴孔友等人的研究，准噶尔盆地的不整合结构被划分为三个部分：包括不整合面上的沉积层、风化粘土层以及半风化的岩石层[8]。

济阳坳陷经历了频繁的构造活动，导致多个不同规模的不整合形成。在第三系地层中，共形成了 6 处明显的一、二级不整合[9]。隋风贵(2005)、向立宏(2009)、陈涛(2009)等在研究济阳坳陷的不整合时认为，该区域前第三系与第三系间的不整合因间隔时间较长，通常形成明显的风化层，呈现出三层结构。在第三系中，各不整合由于侵蚀时间相对较短，粘土层发育较为有限，通常呈现为双层构造。利用宏观模式和微观结构对济阳坳陷的非连续结构进行了识别，并将其划分为 16 种不同的类型[6]-[11]。

本研究通过观察济阳坳陷地区的取心井岩心，结合矿物成分分析、元素含量检测以及薄片显微镜观察等方法，对该区域的不整合结构进行了分类研究。根据风化壳的形成特征及其内部分解出的风化黏土层规模，可以将济阳坳陷的一种不整合构造分类为三种类型：I型、II型和III型结构(图 1 所示)。

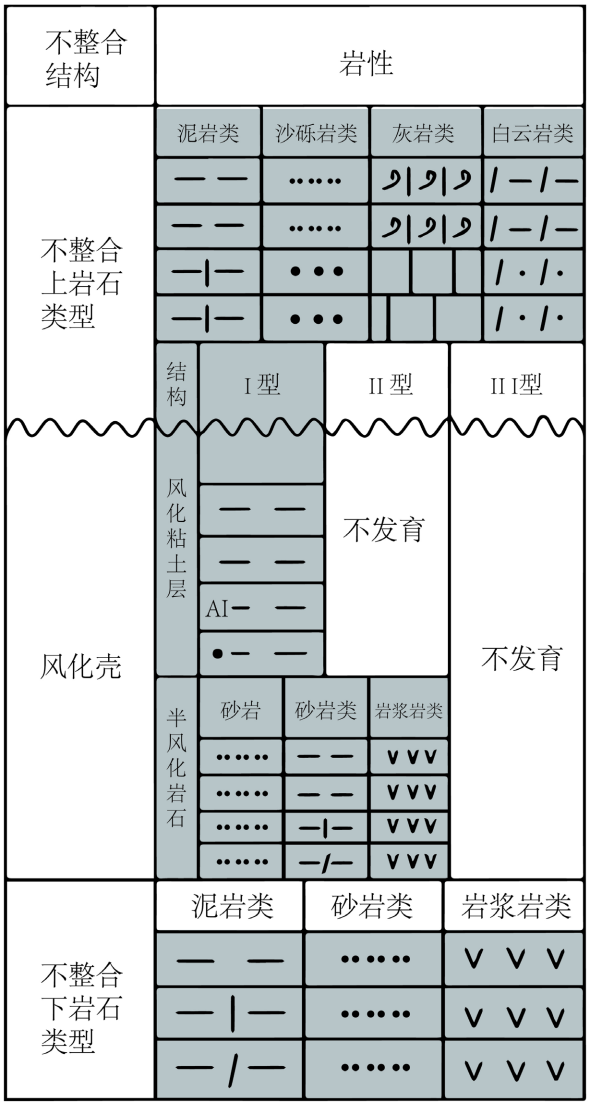

Figure 1. Classification model diagram of unconformity types in the Jiyang Depression
图 1. 济阳坳陷不整合类型划分模式图

I型结构特指包含风化壳的不整合面，在这种风化壳中发展出了风化黏土层，属于一种相对典型的地质不整合类型。这种不整合通常意味着一个持续较长的地质间断期，在此期间，岩石经历了强烈的风化过程。黏土层中的岩石经过风化会完全改变，在一些经历风化的岩层里，仅有特定的岩石块会受到影响。此外，岩石的裂缝发育得非常明显，特别是在碳酸盐类岩石中，可以看到明显的溶蚀孔洞。

II 型结构是指在不连续表面上形成的风化层，其特征是由部分风化的岩石组成，并且没有因风化产生的粘土层。济阳坳陷内的第三系通常显示出II型构造特征的不整合现象。这种不整合的形成可以归为两种原因机制：首先，不整合面经历了长时间的中断期，使得原先存在的风化黏土层由于后续的不佳保存条件而被破坏；另外，由于沉积中断时持续的时间不长，岩石未能经历充分的风化过程，因此未形成风化黏土层。III型结构是指不整合界面两边存在沉积中断现象，并且不整合面以下未能观察到明显的风化壳特征。其形成原因可以归为两类：一种是由于地质现象(例如流水侵蚀、风力搬运等)导致风化壳被侵蚀剥离的不整合类型；另一种类型的不整合是由于沉积中断时间较短或环境条件不适合风化发生，导致岩石未经历显著风化过程而形成的。

3. 不整合不同结构层的矿物学及元素地球化学特征

3.1. 矿物学特征

岩石中的各种矿物质对风化的抵抗力各不相同，其中石英的抗风化能力最为出色，几乎不受化学风化的影响。相比之下，长石稳定性不如石英，而碳酸盐矿物则极为不稳定，在岩石风化过程中，那些风化抗性较弱的矿物很容易转化为各种类型的粘土矿物。在特定条件下，这些粘土矿物还可能进一步演变成更为稳定的矿物，比如铝土矿和蛋白石等[12]。由于风化的强度各异，构造层中的岩石展现出各种独特的矿物特性。在对济阳坳陷地区的不整合风化壳和未风化岩石样本进行的矿物组成深入研究中，结果表明，风化过程对岩石的化学成分具有显著影响。具体来说，风化壳岩石中稳定矿物的比例升高，主要矿物为石英和粘土，以长石含量较少，仅占 10%左右，主要为钾长石，并几乎没有方解石。在风化层中，黏土经过了非常剧烈的风化作用，使得岩石的原始结构彻底分解。在这个过程中，特别是针对钠长石部分，长石几乎被彻底分解。在此期间，石英和黏土矿物成为了主要成分，两者合计的比例接近 90%。另外，在一些风化粘土层样本中发现赤铁矿的迹象，这可能归因于某些铁质矿物经历了剧烈的氧化过程。同时，粘土矿物中的高岭石的发现，进一步表明岩石经历了相对较强的风化过程。半风化岩石的崩解主要依赖于大气降雨通过裂隙的侵蚀和过滤，因此，这些岩石中裂缝的发展尤为突出，形成了复杂多样的网格结构。相较于高度风化的黏土层，半风化岩层保留了更多的原生矿物特征，矿物学分析表明，该层段主要由黏土矿物(30%~40%)、长石(25%~35%)和石英(20%~30%)组成，三者合计占比达 85%~95%，反映出中等程度的风化作用。在这些材料中，长石的比例较大，特别是钠长石，其含量显著高于风化黏土层。此外，研究表明，高岭石在黏土矿物中的比例较低，甚至少于经过风化作用的黏土层。未风化的岩石，因未受地表淡水的侵蚀作用，因此保留了其原有特性(表 1)。

3.2. 元素地球化学特征

矿物的风化稳定性主要取决于其化学成分的反应活性。在岩石中，元素如钙、钠、镁和钾容易流失，而锰、铁、硅和铝则具有更高的稳定性，这些元素的转移能力可以相差数千倍[13]。化学风化的基本原理包含母岩中原生矿物的溶解及转化步骤。在这个过程中，各种元素(如钙、镁、钾、钠、硅、铝、铁、锰、钛等)会从矿物的晶体结构中释放到溶液中，这些元素可能通过流动、沉积或形成新的次生矿物被固定或移动出去。随着风化过程的不断深入，岩石中的矿物逐步分解和变化，一些具有较高活跃度的元素(例如钙、镁、钾、钠等)被大量风化流体带走，因此它们在风化壳中的含量明显低于原始岩石。在这过程中，那些相

对稳定且难以移动的元素(例如硅、铝、铁、锰和钛)通常会留在风化壳内，并显示出比母岩更高的富集程度。在岩石风化过程中，各种元素呈现明显的差异性，这种差异在风化壳的不同层次中表现得尤为突出。

Table 1. Analysis of rock and mineral content in the weathered crust of Well Zhanbei 2 (Shahejie Formation Member 1/Member 4)
表 1. 沾北 2 井(沙一段/沙四段)风化壳岩石矿物含量分析

井号	结构层	深度 (m)	石英 (%)	长石(%)	斜长石 (%)	方解石 (%)	粘土矿物总量 (%)	高岭石 (%)
沾北 2 沙一段/沙四段	未风化岩石	1431.1	16	17	5	73	3	0.87
	风化粘土层	1431.7	45	0	0	0	53	19.89
	半风化岩石	1432	52	11	4	0	34	11.9
		1434.6	50	26	12	0	24	7.68

经过对济阳坳陷地区风化壳的岩石元素进行详细研究，可以发现，与未风化的岩石相比，风化后的岩石中铝(Al)、锰(Mn)和钛(Ti)元素含量显著增加，而钙(Ca)和镁(Mg)的含量则有所减少，同时在同一时间段内，钾(K)元素的波动幅度显得相对稳定，此外在风化的黏土层中，与半风化岩石相比，元素的积聚和损失现象显得更加明显。以陈 25 井的风化壳泥灰岩为例，由于地层水的持续风化和淋滤作用，铝(Al)、铁(Fe)、锰(Mn)和钛(Ti)等元素的浓度相较于未风化的泥灰岩有所上升，尤其是铝元素的增加最为明显。新鲜基岩中铝元素含量普遍偏低，但经历长期风化作用后，铝元素会发生显著富集。研究表明，风化岩层的铝含量可达原岩的 10~15 倍，这一现象主要与硅酸盐矿物分解和次生黏土矿物形成过程中的元素迁移富集有关。风化泥灰岩中的钙元素流失相当严重，几乎所有的钙都被地下水冲刷走了，流失量达到了约 98% (图 2)。

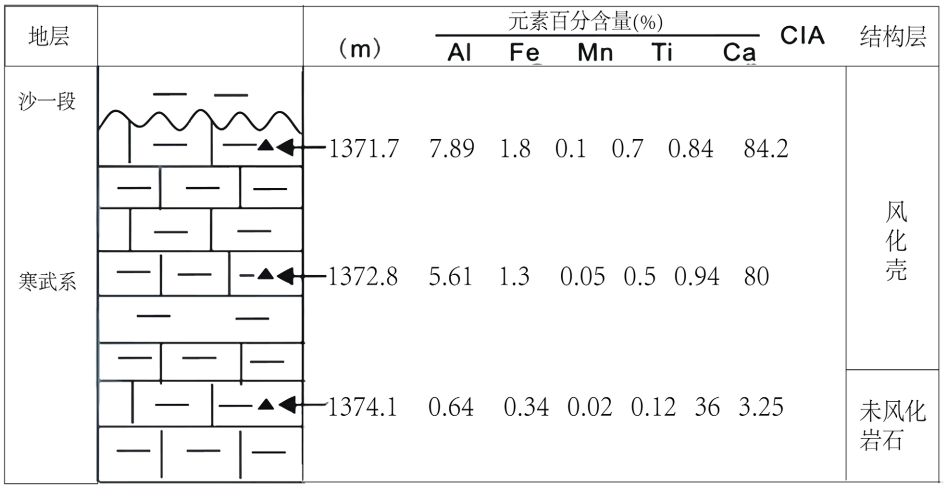

Figure 2. Comparison diagram of element content between weathered and unweathered marl in the weathered crust of Chen 25 Well
图 2. 陈 25 井风化壳中泥灰岩与未风化泥灰岩元素含量对比图

4. 不同结构层化学风化程度的差异

本文通过引入多种化学风化指标，从定量角度评估了不同构造层中碎屑岩的风化程度，研究中采用了五种关键指标进行分析，具体包括：帕克风化指数(WIP)、威格特残余指数(V)、化学蚀变指数(CIA)、

化学风化指数(CIW)以及斜长石蚀变指数(PIA)，以弥补单纯依靠矿物成分和元素含量进行定性分析的局限性。文章中详细说明了这些指标的计算方法，并提供了风化界限值(表 2) [13]-[18]。

Table 2. Calculation formulas and threshold values for chemical weathering indicators
表 2. 化学风化指标计算公式及界限值

指标	计算公式	未风化	完全风化	资料来源
WIP	(100) [(2Na_2O/0.35) + (MgO/0.9) + (2K_2O/0.25) + (CaO/0.7)]	>100	0	Parker (1970)
V	(Al_2O_3 + K_2O)/(MgO + CaO + Na_2O)	<1	无限大	Roaldset (1972)
CIA	(100) [Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]	≤50	100	Nesbitt (1982)
CIW	(100) [Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]	≤50	100	Harnois (1988)
PIA	(100) [(Al_2O_3 – K_2O)/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O – K_2O)]	≤50	100	Fedo *et al*. (1995)

本研究聚焦济阳坳陷地区，运用化学风化指标系统对比了风化壳与基岩的风化特征。结果显示，不整合面及风化壳下伏岩层的风化程度显著偏低，具体表现为：CIA、CIW 和 PIA 三项指标均小于 50，V 值维持在 1 以下，而 WIP 则显著高于 100，这些数值表明该类岩石基本处于未显著风化状态。这一发现为认识该区域岩石风化特征提供了定量依据。这些指标揭示了这些岩石仍未显著风化，相比之下，风化壳中的岩石表现出较高的 CIA、CIW 和 PIA 值(均高于 50)，V 值超过 1，然而 WIP 值低于 50。这些指标充分显示，风化壳内的岩石已经经历了一定程度的风化过程。与此同时，根据图 3 中的数据显示，风化壳岩石的风化指数大多超过临界风化值，说明其已完成了从岩石向土壤初始演化的重要阶段。因此，化学风化指标为识别不整合构造中风化层与未风化岩石之间的界限提供了定量、可靠的判别依据。然而，由于风化过程中元素的均匀化效应，以及风化指标主要关注碱金属和碱土金属元素的流失，这种变化在岩石风化初期就已经发生[19] [20]。在岩石转变为土壤之前，元素的流失基本上已经完成。因此，化学风化指标通常只适合用来评估岩石在初期风化或刚转化为土壤时的风化程度。为克服 CIA、CIW 等指标在 K 交代与硅增浓背景下的局限性，本文进一步引入 A-CN-K 三角图与矿物热力学稳定性约束，用以厘清风化演化路径，增强解释的物理－化学一致性与可信度。

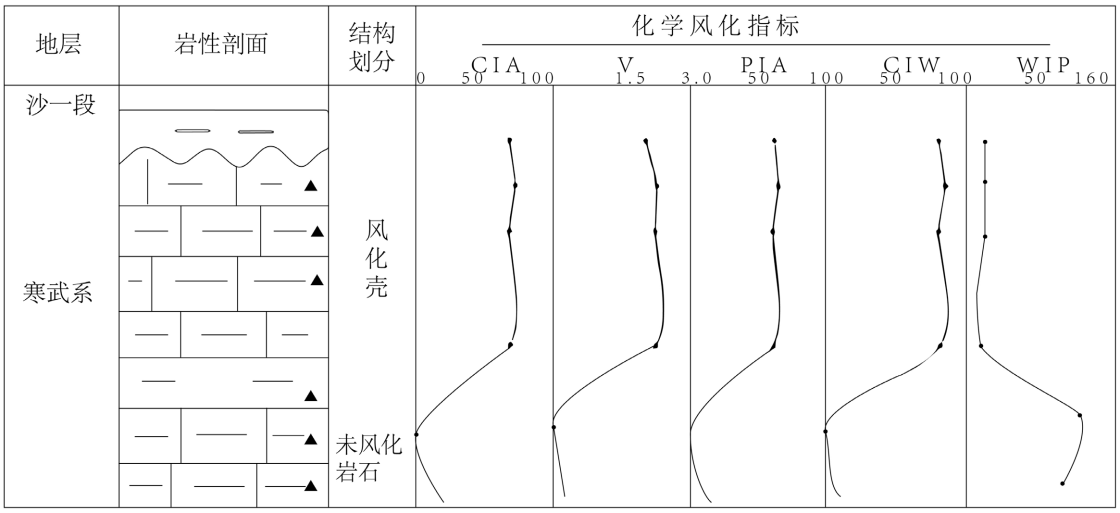

Figure 3. Comparison of chemical weathering indicators between weathered and unweathered rocks in Well Chen 25 (Guantao Formation/Shahejie Formation Member 1)
图 3. 陈 25 井(馆陶组/沙一段)风化壳岩石与未风化岩石化学风化指标对比图

5. 结论

(1) 根据风化壳的分布范围和风化黏土层的深度，济阳坳陷的不整合结构分为三种类别：I型、II型以及III型。

(2) 风化作用会导致岩石的矿物成分发生显著变化，使得风化壳中的矿物含量与未风化岩石明显不同，具体表现为岩石主要由石英和粘土矿物构成且长石显著减少，同时几乎不含方解石，此外其中高岭石的形成相对较多，而在风化程度更深的黏土层中，诸如黏土矿物和高岭石的比例较半风化岩石更高，相比之长石的比例则显著降低。

(3) 根据元素含量变化的分析，风化壳岩石受到风化过程以及地层水淋滤的影响，显示出铝、铁、锰、钛元素的浓度增加，而钙、镁元素则相对减少的特性。风化黏土层表现出更显著的元素迁移特征，其元素富集率和淋失速率均明显高于半风化岩层，具体表现为：黏土层的元素活化迁移强度可达半风化层的2~3 倍，这种差异主要源于黏土层更发育的次生矿物和更活跃的表生地球化学过程。

(4) 运用化学风化指数评估岩石的风化情况，是量化不整合构造分级的有效方法。

基金项目

国家重大专项项目“渤海湾盆地精细勘探关键技术”，编号 2016ZX05006。

参考文献

[1] Hutton, J. (1788) X. Theory of the Earth; Or an Investigation of the Laws Observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land Upon the Globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **1**, 209-304. https://doi.org/10.1017/s0080456800029227

[2] Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1980) Glossary of Geology. American Geological Institute, 749.

[3] 付广, 薛永超, 付晓飞. 油气运移输导体系及其对成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2000, 22(1): 24-26.

[4] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构的地球物理响应及油气成藏意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 328-332.

[5] 张建林, 地层不整合对油气运移和封堵的作用[J]. 油气地质与采收率, 2004, 12(2): 26-29.

[6] 隋风贵, 赵乐强. 济阳坳陷不整合结构类型及控藏作用[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 161-167.

[7] Little, A.L. (1969) The Engineering Weathering Classification of Residual Tropical Soils. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Special Session on the Engineering Properties of Lateritic Soils*, Mexico City, 28-29 August 1969, 1-10.

[8] 李丕龙, 庞雄奇. 陆相断陷盆地隐蔽油气藏形成-以济阳坳陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 315-357.

[9] 向立宏, 周杰, 赵乐强, 等. 济阳坳陷不整合结构的类型、特征及意义[J]. 断块油气田, 2009, 16(1): 9-11.

[10] 陈涛, 蒋有录, 宋国奇, 等. 济阳坳陷不整合结构的发育过程及发育模式[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 34-36.

[11] 赵澄林, 朱筱敏, 主编. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 6-15.

[12] Price, J.R. and Velbel, M.A. (2003) Chemical Weathering Indices Applied to Weathering Profiles Developed on Heterogeneous Felsic Metamorphic Parent Rocks. *Chemical Geology*, **202**, 397-416. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.11.001

[13] Parker, A. (1970) An Index of Weathering for Silicate Rocks. *Geological Magazine*, **107**, 501-504. https://doi.org/10.1017/s0016756800058581

[14] Roaldset, E. (1972) Mineralogy and Geochemistry of Quaternary Clays in the Numedal Area, Southern Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **52**, 335-369.

[15] 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

[16] Harnois, L. (1988) The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, **55**, 319-322. https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6

[17] Fedo, C.M., Wayne Nesbitt, H. and Young, G.M. (1995) Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, **23**, 921-924. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:uteopm>2.3.co;2

[18] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生的化学特性研究[J]. 热带地理, 2001, 21(3): 207-212.

[19] 朱立军, 李景阳. 碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 7-16.

[20] 曹国滨, 杨德宽. 济阳坳陷高精度地震采集技术[M]. 北京: 地质出版社, 2021: 8-24.