doi: 10.11720/wtyht.2026.0030
刘洪博, 孔繁鹏, 斯琴毕力格, 等. 松嫩平原西部岩石剖面地球化学特征及其对盐碱地形成的影响[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 635-643. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0030
Liu H B, Kong F P, Siqinbilige, et al. Geochemical characteristics of rock profiles and their impacts on the formation of saline-alkali land in the western Songnen Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 635-643. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0030

松嫩平原西部岩石剖面地球化学特征及其对盐碱地形成的影响

刘洪博[1,2], 孔繁鹏[1,2], 斯琴毕力格[1,2], 张也[1,2], 张磊[1,2]
(1. 中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 吉林 长春 130102; 2. 呼伦贝尔黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 内蒙古 呼伦贝尔 021599)

摘 要: 为揭示松嫩平原西部苏打盐碱地盐分物质来源, 以吉林省白城市洮南市为研究区, 系统研究了大兴安岭东缘火山碎屑岩、花岗岩与砂岩的风化及盐碱离子释放特征。结果表明: 研究区岩石化学风化处于中早期阶段, 风化后释放的离子主要为 Ca^{2+}、K^{+}、Na^{+}和 Si^{4+}, 单位质量内盐碱离子流失量排序为: 火山碎屑岩>砂岩>花岗岩; 地下水从高处丘陵至低洼平原运移过程中, Na^{+}和 HCO_3^{-}大量富集, K^{+}含量略微增加, Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^{-}和 Mg^{2+}流失, pH 值增加。研究明确了火山碎屑岩类斜长石风化是盐碱化形成的主要物源, 中早期化学风化是盐碱离子释放的关键过程, 地形驱动的水盐运移是离子富集的主导路径。该结论为区域盐碱地精准防控与生态修复提供了科学依据。

关键词: 松嫩平原西部; 岩石风化; 苏打盐碱地; 离子释放; 水盐运移
中图分类号: P595; X825; P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)04-0635-09

0 引言

松嫩平原地处中国东北地区核心腹地, 是国家重要的商品粮基地和农牧业生产枢纽[1], 其西部生态屏障功能对区域可持续发展至关重要[2]。松嫩平原西部受地质演化、气候变迁与人类活动叠加影响, 形成大面积盐碱地[3], 呈现盐碱并存、养分贫瘠等典型特征[4-5]。盐碱化不仅造成土壤微生物活性降低、生物多样性减少[6], 更导致土壤颗粒分散、结构破坏[7], 使作物因盐分胁迫出现生长发育受阻、产量品质下降[8] 等问题, 危害粮食生产安全。

松嫩平原盐碱地中盐分主要是 Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$, 属于苏打型盐碱地[9-10]。众多学者研究认为, 区域盐碱化的形成与演化受地质、气候、水文及人类活动等多因素叠加影响, 其中地下水作为盐分运移的关键载体, 其动态变化对盐碱地的发育具有核心调控作用[11-12]。

松嫩平原西部苏打盐碱地沿大兴安岭东麓山前和平原分布[3], 受大兴安岭影响显著。岩石作为土壤形成的物质基础, 其风化过程释放的盐碱离子是地下水中盐分物质的重要来源[13]。大兴安岭分布的岩石类型以中生代火山碎屑岩、花岗岩为主[14], 中南部有古生代砂岩沉积[15], 不同岩石类型的矿物组成差异直接决定风化后盐碱离子的供给能力。因此, 解析不同岩石风化特征及其盐碱离子释放机制, 对阐明区域盐碱地成因本质、构建精准防控体系具有重要的理论与实践意义。

1 研究区概况

研究区地处松嫩平原西部吉林省白城市洮南市, 自西向东依次分布丘陵山区、山区过渡区(冲洪积扇)以及平原区地貌单元。该区域地质构造属于松辽断陷盆地西部坳陷带, 与大兴安岭东麓相邻, 其基底由白垩纪泥质砂岩构成, 上部覆盖第四纪冲

收稿日期: 2026-01-26; **修回日期:** 2026-05-10
基金项目: 中国地质调查局项目“松嫩平原西部 1∶25 万地表基质调查”(DD20240100903)
第一作者: 刘洪博(1991-), 男, 黑龙江牡丹江人, 工程师, 主要从事地表基质调查工作。Email: 2274496829@qq.com
通讯作者: 孔繁鹏(1986-), 男, 黑龙江牡丹江人, 高级工程师, 主要从事地表基质调查工作。Email: kongfanpeng@mail.cgs.gov.cn

积—湖积地层，呈现“下部为砂砾石、中部为湖相黏土、上部为黄土状亚黏土”的三元结构特征。大安—双辽深断裂等构造带的长期活动，促使该区域形成了闭流—半闭流的水文格局[16]，为盐碱离子的聚集创造了构造条件。

洮南市丘陵山区的西部、毗邻大兴安岭一侧发育有大量中生代火山碎屑岩[17]，丘陵山区中部广泛出露古生代砂岩地层，东部则有大面积花岗岩侵入（图 1）。

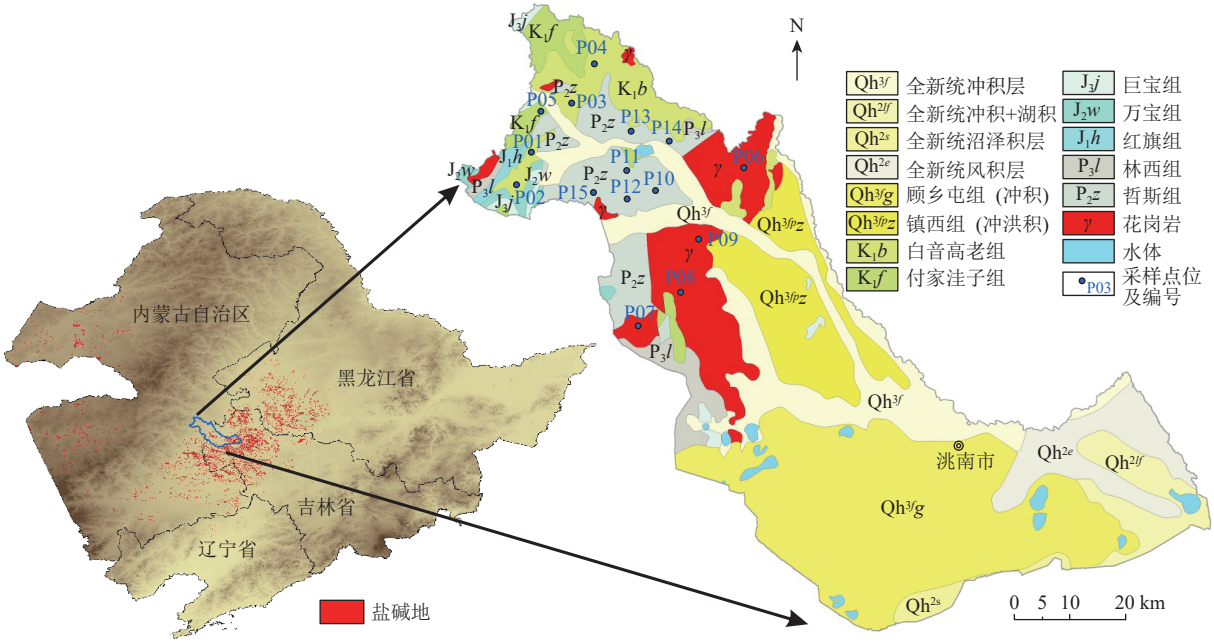


图 1　研究区地质图及岩石风化剖面样品点位采集示意

Fig. 1　Geological map of the study area and rock weathering profile sample point collection schematic

2　材料与方法

为揭露不同岩石类型风化后常量元素的变化特征，在洮南市西北部缓坡丘陵区分别选取 5 个火山碎屑岩剖面、4 个花岗岩剖面和 6 个砂岩剖面，共计 15 个具有代表性的岩石风化剖面进行采样分析，其中 P01~P05 为火山碎屑岩剖面，位于缓坡丘陵西部；P06~P09 为花岗岩类剖面，位于缓坡丘陵东部；P10~P15 为砂岩剖面，位于缓坡丘陵中部区域，具体采样点位见图 1。按照剖面风化程度，从上向下依次分为土壤层、风化层与基岩层。土壤层与风化层样品均在层内中间部位采集，按“X”形采样方法在 4 个端点与中心点采集 5 件子样品，每件子样品质量约为 0.2 kg，充分混合后制作成 1 件测试样品。测试样品剔除植物根系和碎石后，过 10 目筛，粘贴样品编号后送检。岩石样品在基岩层采集，同样采集 5 块基岩样品组合为 1 件测试样品送检。

本次化学分析测试工作由中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心分析测试实验室完成，其中 Al_2O_3、CaO、K_2O、MgO、Na_2O、SiO_2、P、TFe_2O_3 测试方法为 X 射线荧光光谱法，参照《区域地球化学样品分析方法第 1 部分：三氧化二铝等 24 个成分量测定粉末压片—X 射线荧光光谱法》（DZ/T 0279.1—2016）[18] 标准执行；Ti 测试方法为 ICP-MS（电感耦合等离子体质谱法），参照《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分：44 个元素测定》（GB/T 14506—2010）标准执行。

实验室通过测定国家一级标准物质控制分析方法的精密度和准确度，按照试样总数随机抽取 5% 试样，进行重复性检验和异常值重复检查。根据测试质量要求，当含量范围在 3 倍检出限以内，准确度对数差的控制限 $\Delta\lg C$（GBW）在±0.17 之间，精密度控制限 $\lambda \leqslant 0.17$；当含量范围在 3 倍检出限以上，准确度控制限 $\Delta\lg C$（GBW）在±0.15 之间，精密度控制限 $\lambda \leqslant 0.20$。统计表明，本次样品分析检出限、报出率、精密度、准确度等各项质量控制参数均满足要求，分析质量可靠。各指标检出限见表 1。

将各组常量元素与 UCC（上地陆壳）进行对比，可以量化各剖面不同层位常量元素的变化趋势[19]。化学风化指标 *CIA*（化学蚀变指数）可以判断风化程度[20]，计算公式为 $CIA=[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+$

表 1　地球化学指标检出限

Table 1　Geochemical index detection limit

序号	指标	检出限	序号	指标	检出限
1	SiO_2	0.1*	6	Na_2O	0.1*
2	Al_2O_3	0.05*	7	K_2O	0.05*
3	TFe_2O_3	0.05*	8	P	50
4	MgO	0.05*	9	Ti	100
5	CaO	0.05*			

注: “*”表示该指标含量单位为10^{-2}; 其余指标含量单位为10^{-6}。

K_2O)]×100, 式中各分子式代表其摩尔量, 当 CaO/Na_2O>1 时, 采用 Na_2O 的摩尔量作为 CaO*的摩尔量, 当 CaO/Na_2O≤1 时, 采用 CaO 的摩尔量作为 CaO*的摩尔量[21]。

A-CN-K(Al_2O_3-CaO*+Na_2O-K_2O)和 A-CNK-FM(Al_2O_3-CaO*+Na_2O+K_2O-Fe_2O_3+MgO)图解可以揭示风化矿物种类、风化程度以及风化过程中黏土矿物的形成趋势, 式中各分子式为摩尔量归一化百分比。

3　结果分析

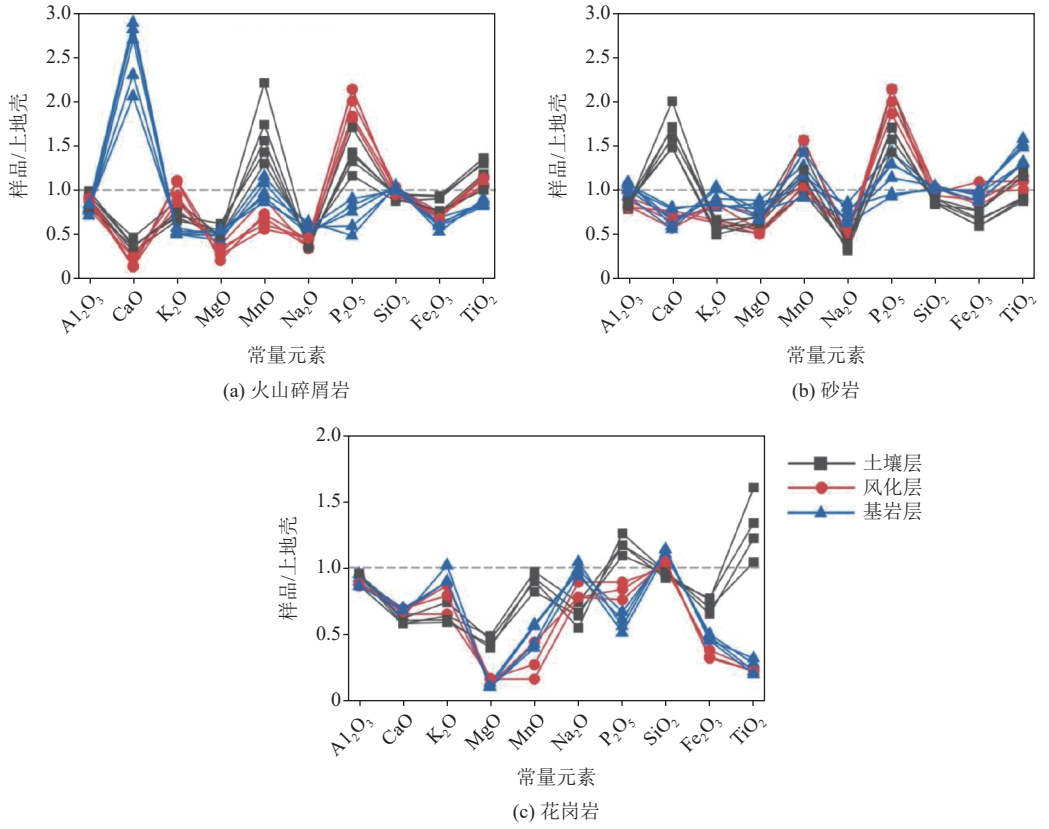
3.1　常量元素变化特征

从岩石剖面 UCC 标准化图(图 2)和常量元素含量(表 2)可以看出, 相较于上地壳平均成分(UCC)[19], 火山碎屑岩中钙(Ca)呈现富集状态, 钾(K)、镁(Mg)、钠(Na)、磷(P)、铁(Fe)等亏损; 岩石风化后, 铝(Al)、钾(K)、磷(P)、铁(Fe)、钛(Ti)等呈现富集状态, 钙(Ca)、钠(Na)和硅(Si)则发生流失。花岗岩中钙(Ca)、镁(Mg)、锰(Mn)、磷(P)、铁(Fe)和钛(Ti)等相对缺乏, 其中钛(Ti)缺乏程度显著; 岩石风化后, 铝(Al)、镁(Mg)、锰(Mn)、磷(P)、铁(Fe)、钛(Ti)出现富集, 钙(Ca)、钾(K)、钠(Na)、硅(Si)发生流失。砂岩中锰(Mn)、磷(P)和钛(Ti)相对丰富, 钙(Ca)、钠(Na)相对缺乏; 风化后, 钙(Ca)、磷(P)富集, 铝(Al)、钾(K)、镁(Mg)、钠(Na)、硅(Si)、铁(Fe)、钛(Ti)流失, 其中以钾(K)和钠(Na)的流失最为明显。

研究区岩石风化过程中流失的离子主要为 Ca^{2+}、K^+、Na^+和 Si^{4+}。Ca^{2+}的流失区域主要集中于火山碎屑岩区, K^+的流失区主要集中在花岗岩和砂岩区。Ca^{2+}、K^+、Na^+的流失对盐碱化的形成起到了促进作用。Si^{4+}的流失主要受硅酸盐风化影响, 风化后形成溶解态硅, 被带离地表。

3.2　化学风化特征

化学蚀变指数(*CIA*)作为一种广泛应用于地球化学领域的经典指标, 主要用于表征岩石在自然环境中经历化学风化作用的程度[22]。研究区 *CIA* 数值



(a) 火山碎屑岩　(b) 砂岩　(c) 花岗岩

图 2　UCC 标准化

Fig. 2　UCC standardized chart

表 2　地球化学指标数值

Table 2　Geochemical index value

岩石类型	采样层位	采集数量	数值类别	Al_2O_3	CaO	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TFe_2O_3	TiO_2
火山碎屑岩	土壤层	5	平均值	13.91	1.60	2.51	1.16	0.13	1.54	0.10	61.34	4.30	0.62
			最大值	14.98	1.99	2.98	1.37	0.17	1.82	0.12	63.33	4.72	0.68
			最小值	12.16	1.30	2.25	1.06	0.10	1.35	0.08	58.25	3.77	0.50
	风化层	5	平均值	13.40	0.77	3.27	0.67	0.05	1.61	0.14	64.78	3.58	0.55
			最大值	13.81	1.04	3.79	0.83	0.07	1.80	0.15	68.83	3.76	0.58
			最小值	12.00	0.58	2.68	0.46	0.04	1.32	0.13	62.14	3.43	0.52
	基岩层	5	平均值	11.87	10.72	1.80	1.09	0.08	2.22	0.05	67.91	3.06	0.43
			最大值	12.73	12.14	1.98	1.19	0.09	2.49	0.06	69.01	3.49	0.45
			最小值	10.83	8.64	1.72	0.98	0.07	1.98	0.03	65.59	2.63	0.41
花岗岩	土壤层	4	平均值	14.11	2.50	2.19	0.97	0.07	2.53	0.08	62.80	3.60	0.65
			最大值	14.55	2.61	2.51	1.07	0.08	2.90	0.09	64.20	3.83	0.80
			最小值	13.27	2.42	1.99	0.88	0.06	2.13	0.08	60.41	3.27	0.52
	风化层	3	平均值	13.60	2.81	2.62	0.33	0.02	3.19	0.06	67.87	1.72	0.11
			最大值	14.33	2.90	2.97	0.38	0.03	3.48	0.06	69.54	1.92	0.12
			最小值	13.06	2.71	2.21	0.26	0.01	3.04	0.05	65.69	1.58	0.11
	基岩层	4	平均值	13.81	2.8	3.16	0.24	0.04	3.83	0.04	73.98	2.35	0.13
			最大值	13.97	2.91	3.46	0.28	0.04	4.04	0.05	75.53	2.52	0.16
			最小值	13.08	2.64	3.04	0.22	0.03	3.66	0.04	72.52	2.23	0.10
砂岩	土壤层	6	平均值	12.83	6.99	2.02	1.36	0.10	1.46	0.12	57.20	3.41	0.50
			最大值	13.50	8.45	2.29	1.58	0.12	1.66	0.15	59.19	3.86	0.61
			最小值	11.99	6.23	1.71	1.13	0.08	1.28	0.10	55.54	2.98	0.44
	风化层	4	平均值	13.07	2.85	2.53	1.28	0.09	2.01	0.14	65.25	4.74	0.55
			最大值	13.97	3.23	2.87	1.60	0.12	2.13	0.15	67.77	5.43	0.58
			最小值	12.17	2.39	2.13	1.12	0.07	1.88	0.13	61.97	4.16	0.50
	基岩层	6	平均值	15.66	2.86	3.08	1.71	0.09	2.83	0.08	67.43	4.72	0.71
			最大值	16.61	3.34	3.54	1.96	0.11	3.34	0.10	69.09	5.01	0.79
			最小值	14.08	2.37	2.72	1.47	0.07	2.41	0.07	66.12	4.40	0.65

注: 各指标含量单位均为10^{-2}。

分析结果显示(图 3), 该区域岩石的化学风化程度整体处于初等风化阶段, 但局部土壤层的风化程度较为显著, 已达到中等风化水平。不同层位风化程度由大到小排序为: 土壤层>风化层>基岩层。这一排序表明, 从下覆的基岩层向上至地表土壤层, 化学风化作用呈现出逐渐增强的趋势, 反映了风化过程在垂向序列中的连续性与递进性。

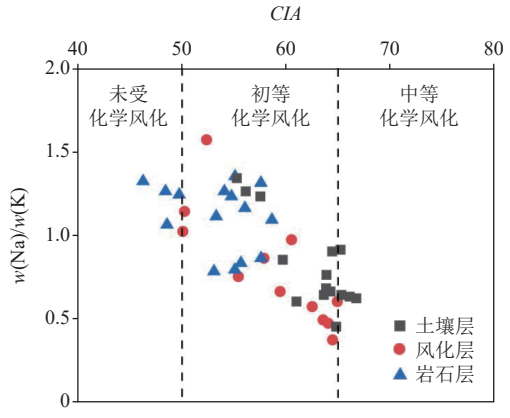


图 3　化学风化参数散点图

Fig. 3　Scatter plot of chemical weathering parameters

4　讨论

4.1　化学风化过程对盐碱离子释放的控制作用

化学风化作为岩石圈与土壤圈之间物质交换的核心地质过程, 主要通过矿物的分解与元素的迁移, 直接调控盐碱离子的释放通量及其赋存形态。A-CN-K 及 A-CNK-FM 三角图解作为一种系统性的地球化学工具, 能够有效解析不同类型岩石在化学风化过程中的演化路径, 并进一步阐明这些风化过程对盐碱离子释放机制的控制作用。A-CN-K 图解表明(图 4), 火山碎屑岩的风化过程以斜长石的分解为主, 而花岗岩与砂岩的风化则同样以斜长石风化为主, 同时伴有少量钾质矿物的风化。

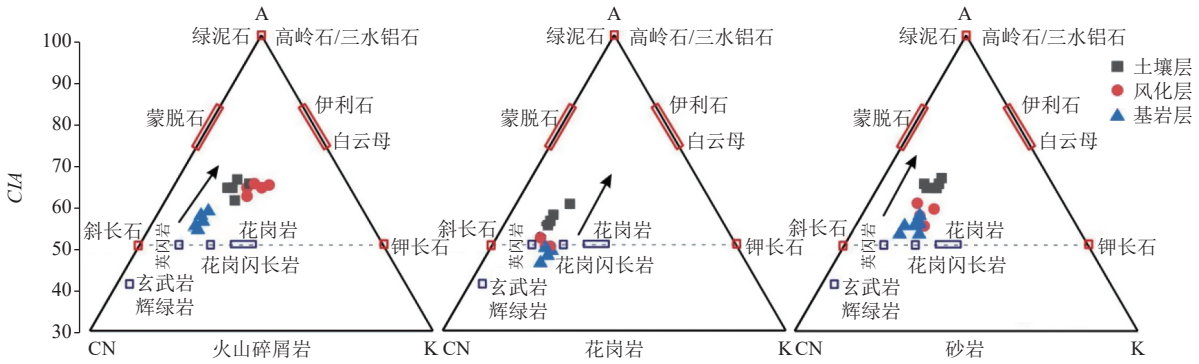


图 4　A—CN—K 图解

Fig. 4　A-CN-K diagram

A-CNK-FM 图解揭示出三类岩石所形成的土壤层普遍表现出向蒙脱石方向迁移的趋势(图 5), 这一规律指示铝硅酸盐分解的主要次生产物为蒙脱石, 反映了目前研究区所处的化学风化阶段仍为中早期。在中早期化学风化阶段, 钾长石因具有较强的风化稳定性, 通常仅发生边缘性的水解反应, 整体风化程度相对有限[23], 花岗岩中钾质矿物的分解应为黑云母、角闪石等富钾易风化矿物的产生。

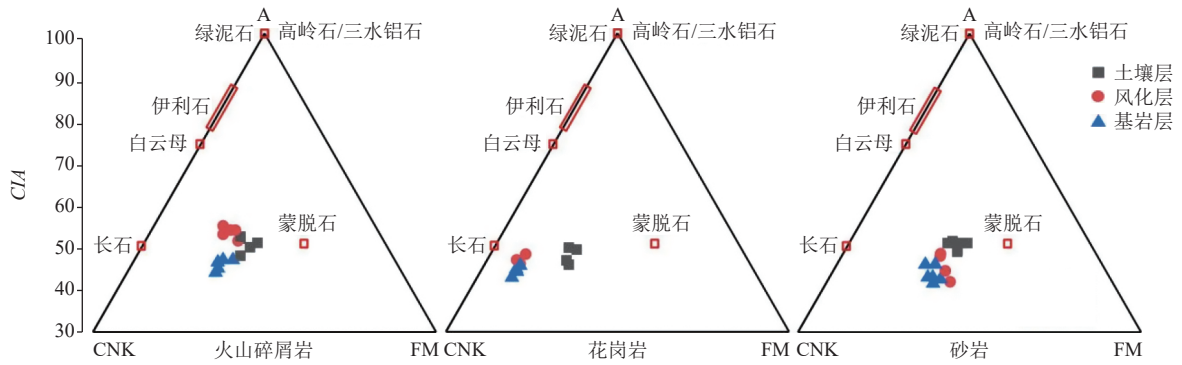


图 5　A-CNK-FM 图解

Fig. 5　A-CNK-FM diagram

研究区内火山碎屑岩以白音高老组地层为主, 物质成分主要为流纹质, 岩石由晶屑、玻屑和火山灰组成, 其中晶屑成分主要由斜长石、钾长石和石英等组成, 含量约占 25%; 岩屑以流纹质和少量安山质凝灰物为主, 含量约占 10%; 玻屑和火山灰含量约占 65%, 玻屑成分以隐晶状为主[24]。

研究区内砂岩属于二叠系哲斯组地层, 胶结物多以泥质为主, 颗粒成分主要为岩屑、长石、石英及少量白云母。岩屑成分主要以火山岩岩屑为主, 含少量沉积岩岩屑, 含量约占 40%~45%; 长石以斜长石为主, 含量约占 20%~30%; 石英含量约占 20%~30%, 白云母含量<10%, 胶结物及杂基含量在 5%~10% 之间[15]。

研究区内花岗岩为中生代二长花岗岩, 岩石主要成分为碱性长石、斜长石、石英、黑云母和少量角闪石。碱性长石含量约占 25%~30%, 斜长石含量约占 35%~40%, 石英含量约占 25%~30%, 黑云母含量约占 4%~6%。

三类岩石中斜长石占比含量较高, 斜长石中又以 Na^+和 Ca^{2+}两种阳离子为主, 是岩石中最先风化分解的浅色矿物, 仅晚于黑云母、角闪石等暗色铁镁矿物。斜长石在干旱、半干旱气候条件下会与 CO_2、H_2O 发生硅酸盐水解, 形成蒙脱石, 释放 Na^+、Ca^{2+}和 HCO_3^-等盐碱离子。

4.2　不同岩石类型风化后盐碱离子的释放

在岩石化学风化进程中, 各类矿物在组成结构、化学特性以及稳定性方面存在固有差异, 这些差异会直接影响盐分离子释放的种类与释放量。由图 6 可知, 三类岩石在遭受化学风化作用后, 因内部矿物成分和反应活性的不同, 释放出的盐分离子在种类和释放量上呈现出显著差异。

火山碎屑岩风化过程中, 易流失的盐分离子主要为 Ca^{2+}和 Na^+, 流失量约为 7.02×10^{-2}(流失量=基岩层离子含量−土壤层离子含量); 花岗岩风化后, 易流失的盐分离子以 Na^+和 K^+为主, 并有少量 Ca^{2+}流失, 流失量约为 1.98×10^{-2}; 砂岩风化后易流失的盐分离

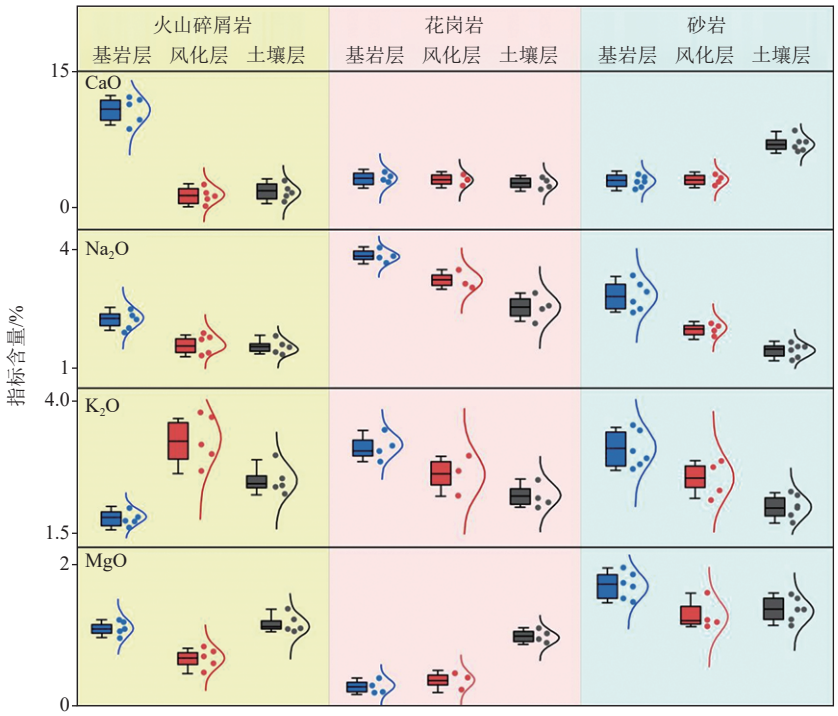


图 6　盐分指标箱型图

Fig. 6　Box diagram of salt index

子以 Na^+和 K^+为主，并有少量 Mg^{2+}流失，流失量约为 2.11×10^{-2}(表 3)。单位质量内不同岩石盐分离子的流失量排序为：火山碎屑岩>砂岩>花岗岩。

表 3　盐分离子平均值

Table 3　Average value of salt ions

岩石类型	层位	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+
火山碎屑岩	土壤层	1.14	2.08	0.70	1.14
	基岩层	7.66	1.49	0.66	1.65
花岗岩	土壤层	1.79	1.82	0.58	1.88
	基岩层	2.00	2.62	0.14	2.84
砂岩	土壤层	5.00	1.68	0.82	1.08
	基岩层	2.04	2.56	1.03	2.10

注：各指标含量单位均为10^{-2}。

大兴安岭属于海西褶皱带与华夏隆起带的叠加区域，主体构造线呈现 NNE 向展布。区内前寒武系至下古生界地层出露较少，上古生界至中生界地层广泛分布，岩性以中生代火山岩为主体，全区占比约为 60%，花岗岩占比约为 30%，沉积岩占比约为 10%。火山岩中又以火山碎屑岩为主，是构成区域最主要的岩石类型，为松嫩平原盐碱化的形成提供了主要物源。

4.3　地下水中盐碱离子特征

洮南市自西向东整体地势逐渐降低，可分为丘陵山区、山前过渡区(冲洪积扇)以及平原区，平原区地势低洼区域为盐碱化的易发区，表明盐碱化的形成受水盐运移的影响显著。分别在丘陵山区、山前过渡区(冲洪积扇)以及平原区采集地下水样品对地下水中 8 大离子含量进行测试，结果显示(表 4)，平原区地下水中 8 大离子以 HCO_3^-为主，平均含量 677.93 mg/L，占比约 58%，其次为 Na^+，含量 169.97 mg/L，占比约 14.64%，其余离子平均含量占比不足 10%，K^+离子含量最低，平均值 1.69 mg/L，占比约为 0.15%。从丘陵山区向平原区过渡过程中，地下水水化学组分呈现明显分异特征：HCO_3^-、Na^+、K^+含量整体呈增长趋势，增幅分别为 370 mg/L、121 mg/L、0.38 mg/L；而 SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Cl^-、Mg^{2+}含量呈减少趋势，减少量分别为 228 mg/L、127 mg/L、63 mg/L、30 mg/L，为精准表征离子相对迁移与流失强度，将减少量换算为摩尔浓度进行对比，分别为 2.37 mol/L、3.17 mol/L、1.77 mol/L、1.25 mol/L；pH 值从 7.7 升高至 8.1。综上分析，地下水在水盐运移过程中，HCO_3^-和 Na^+显著富集，且 HCO_3^-富集程度远高于 Na^+，是控制松嫩平原盐碱化的主导离子；SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Cl^-和 Mg^{2+}呈析出特征，析出的摩尔量级中以 Ca^{2+}、SO_4^{2-}为主，表明离子析出阶段 Ca^{2+}和 SO_4^{2-}的主导地位；同时 pH 值在平原区显著升高，反映水文地球化学环境向碱性演化。

4.4　盐碱离子的运移规律

基于上述研究基础，按照地势从高到低，综合分析盐碱离子的运移规律，丘陵区地势相对较高，处于强风化与强淋溶阶段，Ca^{2+}、Na^+、HCO_3^-等盐碱离子

表 4　地下水中 8 大离子含量平均值

Table 4　Average value of 8 major ions in groundwater

样品采集区域	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	pH
丘陵山区	1.31	49.21	216.95	73.19	336.32	132.03	307.78	7.72
山前过渡区(冲洪积扇)	1.83	60.27	120.06	30.88	201.23	36.19	345.86	7.70
平原区	1.69	169.97	89.62	43.57	108.78	69.42	677.93	8.06

注: 各离子含量单位均为mg/L, pH无量纲。

随淋溶作用进入地下水。高地势所具备的强径流条件致使离子难以沉淀, 直接随地下水向低洼处运移。行至山前过渡区域(冲洪积扇), 地势骤然降低, 径流速度减缓, 松散沉积的砾石层压力降低, 孔隙水中 CO_2 逸出, 易发生碳酸盐($CaCO_3$)和石膏($CaSO_4$)沉淀, 导致 Ca^{2+}和 SO_4^{2-}等盐碱离子析出。在平原低洼区域, 地下水层压稳定, 盐碱离子于地下水中大量积聚, 随毛细水和蒸发扩散向地表运移。在运移过程中, HCO_3^-发生水解, 生成 CO_3^{2-}和 OH^-离子, 形成钙质结核($CaCO_3$), pH 值向弱碱性转变。碱性条件又会抑制 HCO_3^-的水解, 使 HCO_3^-在地下水中长时间累积。随着 pH 值升高, 蒙脱石表面负电荷密度增大, 对高价阳离子的吸附能力增强, Ca^{2+}易与蒙脱石发生阳离子交换, 替换层间 Na^+, 致使地下水中 Ca^{2+}含量进一步减少, Na^+含量进一步增加, 形成高 Na^+和高 HCO_3^-的地下水环境, 最终引发苏打型盐碱化。

5　结论

1)与上地壳常量元素平均含量相比较, 研究区火山碎屑岩区域 Ca 富集, 砂岩区 Mn、P 和 Ti 富集。岩石经历风化作用后, Ca、K、Na、Si 显著流失。

2)松嫩平原西部岩石风化处于中早期阶段, 风化后所形成的黏土矿物以蒙脱石为主, 风化强度呈现出土壤层>风化层>基岩层的规律性特征。岩石中斜长石类矿物通过碳酸化水解反应持续释放盐碱离子, 为苏打盐碱化的形成提供了盐碱离子供给, 其中火山碎屑岩类是松嫩平原盐碱化形成的主要物源。

3)松嫩平原低洼区域是苏打盐碱地的主要形成区域, 盐碱化的形成是离子富集与环境调控共同作用的结果, HCO_3^-是导致松嫩平原西部盐碱化的核心影响离子。在地下水的水盐运移过程中, Na^+和 HCO_3^-大量富集, K^+含量略微增加, Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-和 Mg^{2+}等流失, 最终形成高 Na^+、HCO_3^-的地下水环境, 导致盐碱化发生。

4)本研究对比了大兴安岭不同岩石类型典型剖面风化后盐碱离子释放特征, 明确了火山碎屑岩类斜长石风化是盐碱化形成的主要物源, 中早期化学风化是盐碱离子释放的关键过程, 地形驱动的水盐运移是离子富集的主导路径, 为区域盐碱地精准防控与生态修复提供了科学依据。

参考文献(References):

[1] 姚东恒, 廖宇波, 孔祥斌, 等. 基于"三层"融合的松嫩平原盐碱地资源特征 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 247−257.
Yao D H, Liao Y B, Kong X B, et al. Characteristics of saline-alkali land and resources based on three-layer fusion of saline-alkali soil in Songnen Plain of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 247−257.

[2] 姜芸, 龚辉宇, 沈国杭, 等. 东北寒区市域土地利用空间格局变化的多情景模拟 [J]. 东北农业大学学报, 2025(4): 114−127.
Jiang Y, Gong H Y, Shen G H, et al. Multi-scenario simulation study on changes of urban land use spatialtemporal pattern in cold region of Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025(4): 114−127.

[3] 徐子棋, 许晓鸿. 松嫩平原苏打盐碱地成因、特点及治理措施研究进展 [J]. 中国水土保持, 2018(2): 54−59.
Xu Z Q, Xu X H. The cause of formation and characteristics of soda saline-alkaline land of the Songnen Plain and the study progress of control measures[J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2): 54−59.

[4] 李浩也. 不同氮磷比条件下生物炭对盐碱化草地土壤有机碳的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2025.
Li H Y. Effects of biochar on soil organic carbon in saline-alkali grassland under differential nitrogen-to-phosphorus(N∶P) ratios [D]. Changchun: Jilin University, 2025.

[5] 汤洁, 刘禹晴, 王思宁, 等. 吉林西部盐碱地区稻田土壤有机碳矿化特征 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 162−168.
Tang J, Liu Y Q, Wang S N, et al. Characteristics of organic carbon mineralization in saline-alkali paddy field in western Jilin Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 162−168.

[6] 王世睿, 黄迎新. 松嫩平原盐碱地改良治理研究进展 [J]. 土壤与作物, 2023, 12(2): 206−217.
Wang S R, Huang Y X. Research progress on saline-alkali land improvement in Songnen Plain[J]. Soils and Crops, 2023, 12(2): 206−217.

[7] 陈晓烨, 朱欢欢, 孙晨雨, 等. 苏打盐碱地丛枝菌根真菌群落结构与多样性特征 [J]. 微生物学报, 2025, 65(8): 3413−3431.
Chen X Y, Zhu H H, Sun C Y, et al. Structures and diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities in soda saline-alkali land[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(8): 3413−3431.

[8] 罗雪娇. 苏打盐碱土壤粘粒分散特征及阻控研究 [D]. 哈尔滨: 中

国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2024.
Luo X J. Research on clay dispersion characteristics and amelioration process in saline-sodic soils[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2024.

[9] 张晓光, 黄标, 梁正伟, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究 [J]. 土壤, 2013, 45(2): 332−338.
Zhang X G, Huang B, Liang Z W, et al. Study on salinization characteristics of surface soil in western Songnen Plain[J]. Soils, 2013, 45(2): 332−338.

[10] 田苗, 李鹏, 任安, 等. 脱硫石膏与牛粪、黄腐酸混合配施对盐碱地土壤理化性状及水稻生长的影响 [J]. 北方水稻, 2025, 55(4): 30−33.
Tian M, Li P, Ren A, et al. Effects of desulphurized gypsum combined with cow manure and fulvic acid on improvement of saline-alkali soil physiochemical properties and rice growth[J]. Northern Rice, 2025, 55(4): 30−33.

[11] 赵丹丹. 松嫩平原苏打盐碱地根域限制土壤水盐动态研究 [D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
Zhao D D. Soil water-salt dynamics under root restriction in saline-sodic soils in Songnen plain, Northeast China[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[12] 马敏, 左震, 韩燕东, 等. 松嫩平原土壤盐碱化地表基质成因研究 [J]. 自然资源遥感, 2025, 37(2): 128−139.
Ma M, Zuo Z, Han Y D, et al. Origin of surface substrate for soil salinization and alkalization in the Songnen Plain[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(2): 128−139.

[13] 刘骅欣. 吉林西部盐碱区土壤有机碳时空变化及影响因素研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
Liu H X. Temporal and spatial changes of soil organic carbon and its influencing factors in saline-alkali areas of western Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[14] 武广, 张彤, 王忠, 等. 大兴安岭成矿省成矿单元划分与金属矿床成矿系列 [J]. 西部资源, 2024(6): 1−16, I0001.
Wu G, Zhang T, Wang Z, et al. Division of metallogenic units and metallogenic series of metal deposits in Daxinganling metallogenic province[J]. Western Resources, 2024(6): 1−16, I0001.

[15] 赵英利. 大兴安岭中南部二叠纪砂岩物源分析对晚古生代区域构造演化的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
Zhao Y L. Constraints of provenance analysis of Permian sandstone in central and southern Daxing 'anling on regional tectonic evolution in Late Paleozoic[D]. Changchun: Jilin University, 2010.

[16] 班丁, 王晨, 玄雨菲, 等. 东北地区活动断裂及新构造格架研究——来自遥感影像解释的证据 [J]. 华东地质, 2025, 46(3): 386−401.
Ban D, Wang C, Xuan Y F, et al. Active faults and neotectonic framework in Northeast China—Evidence from remote sensing image interpretation[J]. East China Geology, 2025, 46(3): 386−401.

[17] 张梅. 大兴安岭中南段铜多金属矿床成矿系统研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Zhang M. Study on metallogenic system of copper polymetallic deposits in the middle-south section of Daxinganling[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.

[18] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0279.1—2016 区域地球化学样品分析方法 第 1 部分: 三氧化二铝等 24 个成分量测定 粉末压片—X 射线荧光光谱法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0279.1—2016 Analysis methods for regional geochemical sample-part 1: Determination of aluminum oxide etc. 24 components by pressed power pellets-X-ray fluorescence spectrometry[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[19] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1986, 42(3): 196−197.

[20] Algeo T J, Hong H L, Wang C W. The chemical index of alteration (CIA) and interpretation of ACNK diagrams[J]. Chemical Geology, 2025, 671: 122474.

[21] 马立, 杨静, 张峰. 腾格里沙漠表沙常量元素地球化学特征及其空间分布 [J]. 第四纪研究, 2025, 45(1): 91−104.
Ma L, Yang J, Zhang F. Geochemical element characteristics and spatial distribution of surface sand major elements in the Tengger Desert[J]. Quaternary Sciences, 2025, 45(1): 91−104.

[22] 宋运红, 杨凤超, 刘凯, 等. 黑龙江省海伦地区黑土剖面常量元素地球化学特征及其对物源的指示意义 [J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1105−1113.
Song Y H, Yang F C, Liu K, et al. Geochemical characteristics of major elements in the black soil profiles of the Hailun area, Heilongjiang Province and their implications for provenance[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1105−1113.

[23] 张硕, 李宇, 姜彤, 等. SWIR 光谱特征与矿物相变多指标协同响应对花岗岩风化分级的指示 [J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(11): 3235−3245.
Zhang S, Li Y, Jiang T, et al. SWIR spectral characteristics and mineral phase transformations: Multi-indicator synergistic response for granite weathering classification[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(11): 3235−3245.

[24] 董培培, 李英杰, 王根厚, 等. 内蒙古高尧乌拉白音高老组地质及年代学特征 [J]. 地质力学学报, 2021, 27(1): 135−152.
Dong P P, Li Y J, Wang G H, et al. Geological and chronological characteristics of the Baiyin' Gaolao Formation in Gaoyaowula, Inner Mongolia[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 135−152.

Geochemical characteristics of rock profiles and their impacts on the formation of saline-alkali land in the western Songnen Plain

LIU Hong-Bo[1,2], KONG Fan-Peng[1,2], Siqinbilige[1,2], ZHANG Ye[1,2], ZHANG Lei[1,2]

(1. *Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changchun* 130102, *China*; 2. *Hulunbuir Black Soil Critical*

Zone Scientific Observation and Research Station, *Hulunbuir*　021599, *China*）

Abstract: This study aims to reveal the source of salts in the soda saline-alkali land in the western Songnen Plain. Focusing on Taonan City under the administration of Baicheng City in Jilin Province, this study systematically investigated the weathering and saline-alkali ion release characteristics of pyroclastic rocks, granites, and sandstones along the eastern margin of the Great Xing'an Range. The results indicate that rocks in the study area remain in the early-to-middle stage of chemical weathering, predominantly releasing Ca, K, Na, and Si. The loss of saline-alkali ions per unit mass of the rocks decreases in the order of pyroclastic rocks, sandstones, and granites. When migrating from high-elevation hills to low-lying plains, groundwater is enriched in substantial Na^+ and HCO_3^-, accompanied by a slight increase in the K^+ content and loss of Ca^{2+}, SO_4^{2-}, Cl^-, and Mg^{2+} ions, with the pH value elevated. The results demonstrate that the weathering of plagioclases in pyroclastic rocks contributes largely to salinization and alkalization. Furthermore, the early-to-middle chemical weathering represents the key process of the release of saline-alkali ions, while topography-driven water and salt migration emerges as the dominant path of ion enrichment. The results of this study provide a scientific basis for the precise prevention and control of regional saline-alkali land and ecological restoration.

Key words: western Songnen Plain; rock weathering; soda saline-alkali land; ion release; water-salt migration

（本文编辑: 蒋实）