任孝宗,崔徐甲,秦彦智,等.浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的空间分布特征及其影响因素[J].中国沙漠,2026,46(5):206-220.

浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的空间分布特征及其影响因素

任孝宗[ab],崔徐甲[ab],秦彦智[a],陈天晶[a],崔雯茜[a]

(太原师范学院 a.地理科学学院,b.汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室, 山西 晋中 030619)

摘要:沙漠/沙地地表沉积物易溶盐不仅深刻影响着区域岩石风化和全球盐分循环,也是土壤盐碱化的重要诱因,其空间分布特征被认为主要受控于气候因素,然而在人类活动显著的中国东部沙地,其主控因素仍不清楚。本文测定了浑善达克沙地78个地表沉积物易溶盐的水化学综合指标和10种主要离子,利用冷热点分析、标准差椭圆分析和双变量图对各离子的空间分布特征及其影响因素进行了分析。结果表明:浑善达克沙地78个地表沉积物TDS(溶解性固体总量)和pH的均值仅为15.61 mg·L^{-1}和5.88,属阿列金水化学分类法重碳酸盐和碳酸盐类、钙质组。沙地东、西部地表沉积物易溶盐空间分异明显,西部以HCO_3^-、Ca^{2+}为主,NO_3^-的含量较低,属阿列金I型水;东部受人类活动的影响NO_3^-含量明显增加,属阿列金II和III型水。易溶盐各离子按空间分布特征可分为3类:I类易溶盐离子包括HCO_3^-、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、K^+和F^-,其冷、热点区分别分布在沙地东、西部;II类易溶盐离子包括Cl^-和NH_4^+,冷、热点区不显著;III类易溶盐离子包括SO_4^{2-}和NO_3^-,冷、热点区与I类易溶盐离子相反。从I类到II类和III类易溶盐离子,其标准差椭圆重心不断向东偏移。包括HCO_3^-、Ca^{2+}在内的I类易溶盐离子的空间分布主要受控于气候因素,而NO_3^-受人类畜牧活动的影响显著。主要离子HCO_3^-、Ca^{2+}来源于碳酸盐岩溶解,而NO_3^-来源于人为污染,其他非主要离子则来源于粉尘、降水和硅酸盐岩风化。

关键词:浑善达克沙地;地表沉积物;易溶盐;水化学;影响因素

文章编号:1000-694X(2026)05-206-15 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00115

中图分类号:P342 **文献标志码**:A

0 引言

沙漠/沙地沉积物中的易溶盐(又称可溶盐)是其无机盐的核心组成部分,不仅深刻影响区域岩石风化过程与全球盐分循环,也是土壤盐碱化的关键诱因。在岩石物理风化方面,含易溶盐的水分渗入岩石裂隙与孔隙后,会随水分蒸发发生盐类结晶膨胀,导致岩石裂缝扩大,加速岩石物理风化进程。在岩石化学风化方面,沉积物中的易溶盐可导致碳酸盐岩或硅酸盐岩发生化学风化,引起岩石分解及黏土矿物的生成,尤其是有CO_2参与的岩石风化,能消耗大气CO_2,对全球碳循环和气候变化产生重要影响[1-2]。另外,富含易溶盐的沙漠、沙地沉积物可在风力搬运作用下,以沙尘、粉尘形式向下风向区域输送,为黄土沉积区[3]、海洋[4-5]等区域输入大量易溶盐,是海陆间盐分传输与全球盐分循环的重要纽带[6]。此外,干旱区蒸发强烈、大气降水淋溶作用微弱,盐分极易在表层土壤持续累积,最终引发土壤盐碱化[7]。开展沉积物易溶盐相关研究,有助于精准判定土壤盐害与碱化程度[8],可为盐碱地改良方案优化、耐盐作物种植体系构建提供重要的理论依据与数据支撑[9-10]。

易溶盐按化学性质可分为中性、碱性和酸性3种类型。中性盐由强酸和强碱反应生成,如NaCl;碱性盐由强碱和弱酸反应生成,如Na_2CO_3;酸性盐在酸性介质中形成,并含有Al或Fe(III)等明显的酸性阳离子,如$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$[11]。沙漠沉积物中的易溶盐受多种因素的影响,Marion等[12]认为其是大气输入、岩石风化、化学平衡、土壤淋溶和植物循环等复杂作用的结果。然而,全球沙漠类型多样,

收稿日期:2026-05-25;**改回日期**:2026-06-28

资助项目:山西省基础研究计划(自由探索类)(202403021211205)

作者简介:任孝宗(1983—),男,甘肃白银人,博士,副教授,主要研究方向为水化学、水文地球化学。E-mail:renxzmail@126.com

沙源复杂[13]，控制沙漠/沙地沉积物易溶盐的因素并不相同。例如，位于美国白沙国家公园的白沙沙漠因其独特的地质环境，拥有世界上最大的石膏沙丘群[14]，其沉积物受石膏的影响显著[15]。阿塔卡马沙漠富含石膏、硬石膏、岩盐和硝酸盐等，盐分来源和次生溶解过程显著影响着其沉积物中的易溶盐成分[16]。中国沙漠自然条件差异显著，西部沙漠属于暖温带、温带、高寒干旱荒漠，中部鄂尔多斯沙地属于温带荒漠草原，向东至内蒙古东部和东北平原西部的沙地则属于半干旱地区的干草原带，而位置更东的东部沙地则多属于半湿润草原地带[17]。这种差异导致中国西部沙漠蒸发强烈、降水稀少，降水对地表沉积物的淋溶作用较弱，而中国东部沙地蒸发较弱、降水量较高，降水对地表沉积物的淋溶作用较强，导致表层沉积物易溶盐从西部向东部有规律的减小[18-19]。针对中国西部多个沙漠的研究进一步证实，沙漠表层沉积物易溶盐还受温度的影响[20]，易溶盐含量与其所在地区的经、纬度有较强的相关性[21]。然而，目前关于中国东部沙地地表沉积物易溶盐的专门研究较少，指标选取上也以易溶盐综合性指标为主，缺乏对组成易溶盐的各离子的空间分析[22]。此外，东部沙地在气候上与西部沙漠有显著差异，植被覆盖度较高，人类活动对沙地的影响显著增强，历史上曾因过度的人类活动导致严重的沙漠化[17]，且地表沉积物易溶盐中常含有与人类活动有关的NO_3^-[22]，人类活动如何影响其地表沉积物的易溶盐组成仍不清楚。

浑善达克沙地作为典型的东部沙地之一，其东、西部气候差异显著[23]，畜牧业活动强度也具有东、西差异，为研究气候和人类活动如何影响地表沉积物易溶盐的空间分布规律提供了理想场所。本文对浑善达克沙地 78 个地表沉积物易溶盐的水化学综合指标和 10 种主要离子进行了测定，利用冷热点分析、标准差椭圆分析和双变量图等方法，分析讨论了地表沉积物易溶盐的空间分布特征及其影响因素。

1　研究区概况

浑善达克沙地位于内蒙古中东部，面积约 21 400 km^2，自西向东横跨二连盆地东部至大兴安岭西坡，海拔自西北的约 1 000 m 上升至东南的约 1 300 m，北部则与锡林郭勒草原南缘相接，南部被阴山山脉包围[24-25]（图 1A）。由于浑善达克沙地地处东亚季风北缘，东部受季风影响显著高于西部[23]，沙地东、西部在降水量和植被覆盖度等方面具有明显的经度地带性，其中东部降水量最高可达 500 mm，植被覆盖度高，以固定沙丘为主；西部降水量最低仅约 150 mm，植被稀少，以半固定和流动沙丘为主[17,26-28]（图 1B）。此外，浑善达克沙地东、西部的蒸发量也具有明显的经度地带性，蒸发量自西部的最高约 1 700 mm 下降至东部的最低约 1 140 mm（图 1C）。

2　样品采集与分析方法

2.1　样品采集

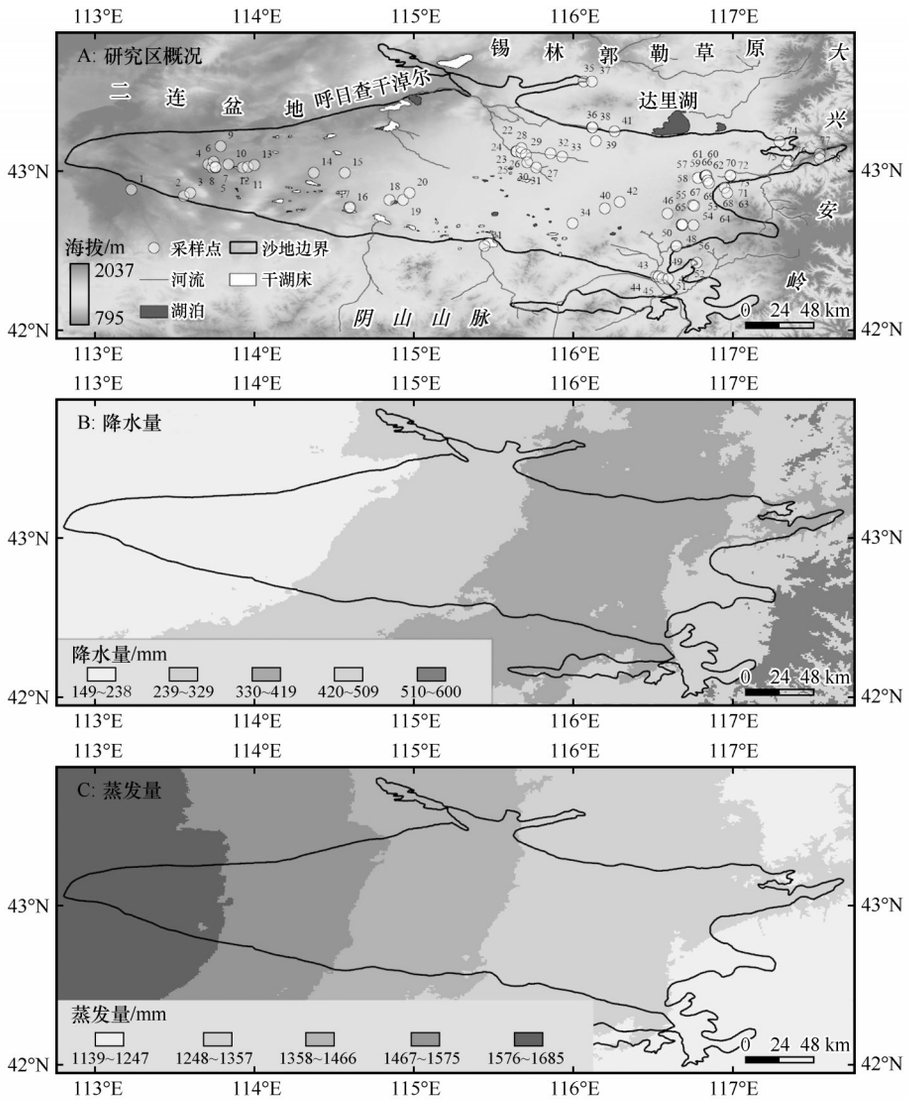
样品均采集自沙丘顶部，为距地表 0~10 cm 混合样，样品质量约 200 g，共采集样品 78 个。浑善达克沙地西部植被覆盖度低，选择流动沙丘顶部采集；沙地东部植被覆盖度高，选择植被相对稀疏、顶部裸露的沙丘采集。

2.2　沉积物易溶盐浸提液的提取和分析

首先，挑拣出样品中的植物残体和其他异物，并将样品置于 105 ℃下烘 24 h 以去除水分。其次，用“四分法”取 30 g 样品，加 150 mL 去离子水，制成 5∶1 的水土混合溶液[20-21,29]，用塑料膜覆盖盛放易溶盐浸提液的烧杯，尽量避免空气中的CO_2溶解，并用超声波振荡 5 min 后静置 24 h，取清液用直径 0.45 μm 的微孔滤膜过滤，获得易溶盐浸提液。再次，使用 HANNA 便携式多参数水质分析仪分析易溶盐浸提液的温度（T）、酸碱性（pH）、氧化－还原电位（Eh）、电导率（EC）、可溶性固体总量（TDS）和盐度（SAL）等理化参数。采用 Gran 滴定法测定易溶盐浸提液中的HCO_3^-，结果的相对标准偏差为 1.2%；易溶盐浸提液中的F^-、Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、Na^+、K^+、NH_4^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}采用离子色谱法测定，标准偏差为 1%。

2.3　冷热点分析

冷热点分析是反映要素空间聚类的一种空间统计方法，该方法通过计算每个要素及其领域属性值的 Getis-Ord G_i*指数来确定高值聚集（热点区）和低值聚集（冷点区），并通过 Z 得分、P 值检验空间集聚的统计显著性[30]：



注：基于内蒙古自治区自然资源厅标准地图服务网站审图号蒙S(2023)037号标准地图制作，底图边界无修改。降雨量、蒸发量数据来源于资源环境科学数据平台2011—2024年中国气象要素各年度平均状况数据集(https://www.resdc.cn/)

图1 研究区概况

Fig.1 Sketch map of the study area

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}x_j - \frac{\sum_{j=1}^{n}x_j}{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j^2}{n} - \left(\bar{X}\right)^2}\sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

式中：G_i*指数是Z得分；x_j是要素j的属性值；$\omega_{i,j}$是要素i和j之间的空间权重，其矩阵类型为固定距离，采用欧氏距离法，距离阈值设置为48 000 m，并应用FDR校正；n为要素总数。本文包括10类要素：即HCO_3^-、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、K^+、F^-、Cl^-、SO_3^{2-}、NH_4^+和NO_3^-，每类要素的总数为78，分别计算每类要素的G_i*指数并进行可视化，可获得上述10种离子的冷热点分布格局图。

当Z>0且P<0.05时为高值热点集聚；当Z<0且P<0.05时为低值冷点集聚；P>0.05表示空间分布呈随机格局，无显著集聚特征。置信度采用99%、95%、90%划分冷、热集聚等级，另外还包括1个不显著区域，因此理论上最多可划分为7个等级，但因各离子的空间分布差异，有些离子的等级数可能少于7个。

2.4 标准差椭圆分析

标准差椭圆(Standard Deviational Ellipse，SDE)

是基于椭圆的重心、方位角、x轴标准差、y轴标准差定量描述地理要素空间分布规律的空间统计方法[31]：

$$\overline{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{2}$$

$$\overline{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{3}$$

式中：$\overline{X}_w$和$\overline{Y}_w$分别为椭圆重心横、纵坐标；x_i和y_i为观测变量的空间坐标；w_i表示其空间权重，为各易溶盐离子的实测值，椭圆大小为1个标准差。

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{y}_i^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{y}_i^2\right)^2 + 4\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{x}_i^2 \tilde{y}_i^2}}{2\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \tag{4}$$

式中：θ为标准差椭圆的方位角；$\tilde{x}_i$和$\tilde{y}_i$分别表示各观测变量到加权平均中心的坐标偏差；w_i含义同式(2)和(3)。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(w_i \tilde{x}_i \cos\theta - w_i \tilde{y}_i \sin\theta\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}} \tag{5}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(w_i \tilde{x}_i \sin\theta - w_i \tilde{y}_i \cos\theta\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}} \tag{6}$$

式中：σ_x和σ_y分别表示椭圆x轴和y轴的标准差；w_i含义同式(2)和(3)。

3　结果

3.1　地表沉积物易溶盐水化学特征

由于TDS和pH与其他水化学综合指标关联性较强，因此可以用其指示水体的综合特征[32]。浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的TDS含量从4.00 mg·L^{-1}到50.80 mg·L^{-1}，均值为15.61 mg·L^{-1}；pH范围为4.51~6.78，均值为5.88(表1)。两者均较位于中国西部极端干旱环境的塔克拉玛干沙漠低[20]。需要说明的是，地表沉积物易溶盐采用去离子水浸提，去离子水极易吸收空气中的CO_2而导致其pH降低至5.6[33]，当水中有少量酸时，其pH可继续降低。

浑善达克沙地地表沉积物易溶盐中的阴离子包括F^-、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-和HCO_3^-，阳离子包括NH_4^+、Na^+、K^+、Mg^{2+}和Ca^{2+}。各样品中HCO_3^-和Ca^{2+}的含量均大于1 mg·L^{-1}，最高分别可达114.29 mg·L^{-1}和19.62 mg·L^{-1}；而F^-和NH_4^+的含量均小于1 mg·L^{-1}，最低可达0.00 mg·L^{-1}；其他离子的含量介于上述两类离子之间(图2)。

阿列金水化学分类法根据HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+的物质的量浓度将水体分为类、组和型三级[32]，浑善达克沙地地表沉积物易溶盐浸提液均属于阿列金水化学分类法重碳酸盐和碳酸盐类、钙质组，但分属于3个不同的水型。其中阿列金I型水多位于沙地西部，而阿列金II、III型水多位于沙地东部。前者的TDS、HCO_3^-、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、K^+、F^-的均值皆高于后者；而后者的NO_3^-均值高于前者。各水型的Cl^-和NH_4^+均值近似，而阿列金II型水的SO_4^{2-}均值显著高于阿列金I、III型水(表1)。此外，HCO_3^-、Ca^{2+}、NO_3^-三者占各离子总和的平均值高达72.88%(当量百分比)，为易溶盐中的主要离子。

浑善达克沙地地表沉积物易溶盐中普遍含有NO_3^-而不含CO_3^{2-}，在某些样品中甚至取代HCO_3^-成为优势阴离子。由于阿列金水化学分类法中没有考虑NO_3^-，为了全面分析样品各离子的绝对含量和相对含量，以NO_3^-代替CO_3^{2-}绘制Maucha图(图3)。位于沙地西部的地表沉积物易溶盐以HCO_3^-、Ca^{2+}和Mg^{2+}为主，NO_3^-的含量较低；沙地东部地表沉积物易溶盐中NO_3^-的含量明显增加，部分样品中甚至超过了HCO_3^-。

3.2　地表沉积物易溶盐离子空间分布特征

基于ArcGIS Pro 3.6，通过计算各离子的Getis-Ord G_i*指数，按照置信水平划分等级，并按照各离子的实际大小绘制为直径大小不等的圆，再叠加标准差椭圆的结果，得到浑善达克沙地10种离子冷热点及标准差椭圆空间分布格局(图4)。综合来看，浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的不同离子按照空间分布特征可分为3类。I类易溶盐离子包括HCO_3^-、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、K^+和F^-(图4A~F)。这类离子空间集聚特征显著，其中冷、热点区分别分布在沙

表 1 易溶盐浸提液水化学综合指标和各离子含量

Table 1 The synthetic parameters and ion contents in extraction solution from soluble salt

样品类型	统计值	TDS	pH	HCO_3^-	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	NO_3^-	$HCO_3^-+Ca^{2+}+NO_3^-$当量占比/%	包含样品编号
阿列金I型 (n=49)	最小值	4.00	4.54	6.14	1.64	0.23	0.26	0.72	0.04	0.11	0.02	0.00	0.01	58.01	1~18、20~33、36~45、48、56、58、66、70、72、73
	最大值	50.80	6.54	114.29	19.62	6.66	6.28	12.05	0.92	7.61	2.41	0.42	7.63	89.14	
	均值	16.66	5.69	33.66	7.05	1.27	1.51	2.29	0.22	0.55	0.52	0.04	1.77	75.34	
	标准差	11.04	0.60	30.25	4.85	1.42	1.45	1.99	0.22	1.07	0.60	0.07	1.75	7.09	
	变异系数	0.66	0.11	0.90	0.69	1.12	0.96	0.87	0.99	1.93	1.16	1.91	0.99	0.09	
阿列金II型 (n=3)	最小值	6.00	4.51	1.56	2.22	0.21	0.41	0.43	0.00	0.15	0.16	0.00	0.36	57.35	57、60、67
	最大值	22.70	6.78	13.12	7.93	0.94	1.55	2.23	0.25	0.65	1.67	0.15	15.90	79.84	
	均值	13.52	6.18	5.43	4.14	0.45	0.93	1.07	0.09	0.33	0.70	0.02	4.21	69.38	
	标准差	4.91	0.52	2.13	1.32	0.16	0.27	0.50	0.06	0.12	0.39	0.03	4.40	5.63	
	变异系数	0.36	0.08	0.39	0.32	0.36	0.29	0.46	0.67	0.38	0.55	1.41	1.04	0.08	
阿列金III型 (n=26)	最小值	9.60	6.06	5.60	2.64	0.33	0.67	0.57	0.06	0.33	0.82	0.01	1.73	49.68	19、34、35、46、47、49、50、51、52、53、54、55、59、61、62、63、64、65、68、69、71、74、75、76、77、78
	最大值	29.60	6.32	8.71	4.50	1.22	1.36	2.57	0.20	1.48	6.74	0.02	3.17	70.99	
	均值	16.67	6.19	7.05	3.59	0.64	0.93	1.29	0.12	0.73	2.85	0.02	2.35	62.95	
	标准差	11.22	0.13	1.57	0.93	0.50	0.37	1.11	0.07	0.66	3.37	0.01	0.74	11.58	
	变异系数	0.67	0.02	0.22	0.26	0.77	0.40	0.86	0.61	0.90	1.18	0.34	0.32	0.18	
全部水型 (n=78)	最小值	4.00	4.51	1.56	1.64	0.21	0.26	0.43	0.00	0.11	0.02	0.00	0.01	49.68	1~78
	最大值	50.80	6.78	114.29	19.62	6.66	6.28	12.05	0.92	7.61	6.74	0.42	15.90	89.14	
	均值	15.61	5.88	23.23	5.95	0.97	1.29	1.84	0.17	0.48	0.67	0.03	2.61	72.88	
	标准差	9.45	0.61	27.54	4.16	1.19	1.19	1.71	0.19	0.86	0.88	0.06	3.09	7.55	
	变异系数	0.61	0.10	1.19	0.70	1.23	0.92	0.93	1.09	1.77	1.31	1.90	1.18	0.10	

注：TDS表示可溶性固体总量（$mg\cdot L^{-1}$）；pH表示酸碱度（无量纲）；各离子含量单位均为$mg\cdot L^{-1}$。

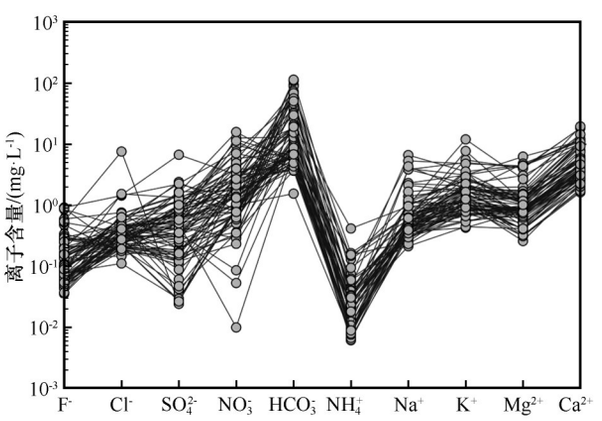


图2 易溶盐各离子的分布特征

Fig.2 Distribution patterns of soluble salts ions

地东、西部，且沙地东部的离子含量通常低于西部，而不具有显著性的区域多位于冷、热点区之间。根据标准差椭圆的分析结果，这类离子的分布重心均位于沙地中部，空间分布呈现出显著的方向性，方位角呈近东-西走向。椭圆的长半轴（x轴）较长，说明在主导方向上的分布较为离散，东西方向的空间差异显著；而椭圆的短半轴（y轴）较短，说明在南北方向上的集聚程度更高、空间差异相对较小。另外，与HCO_3^-和Ca^{2+}相比，K^+的空间分布特征虽然并不显著，但整体仍具有上述特征。

II类易溶盐离子包括Cl^-和NH_4^+（图4G~H）。这类离子的含量较低，空间集聚特征也不显著，与I类易溶盐离子差异显著，暗示控制两者空间分布的影响因素不同。其中，Cl^-的冷热点分布呈现单点高值集聚、整体离散的特征；NH_4^+的冷热点分布无显著高值或低值集聚特征。这类离子的标准差椭圆重心较I类易溶盐离子偏东，方位角仍呈近东-西走向，其中Cl^-标准差椭圆的长、短轴之间的差异明显减小，

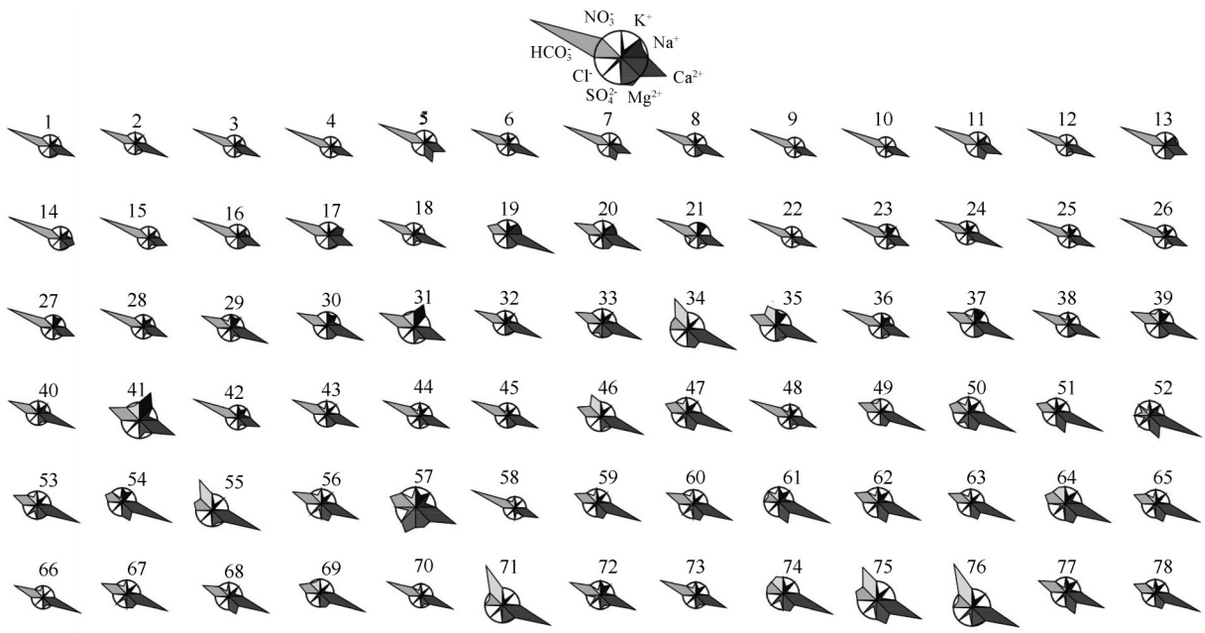


图 3　Maucha 图指示的易溶盐离子的绝对含量和相对含量

Fig.3　The absolute and relative contents of soluble salt ions indicated by the Maucha diagram

其方向性较I类易溶盐离子差。

III类易溶盐离子包括 SO_4^{2-} 和 NO_3^-（图 4I~J）。该类离子的冷热点分布表现为东部热点区以多点高值集聚、西部冷点区以不显著为主的特征，离子含量东高西低，整体空间分布格局与I类易溶盐离子相反。这类离子的标准差椭圆重心较II类易溶盐离子更偏东，但仍然为近东-西走向，其长、短轴之间的差异也更少，表明其方向性是三类离子中最差的。此外，NO_3^- 的含量通常较 SO_4^{2-} 高，前者的均值一般大于 1 mg·L^{-1}，而后者的含量通常小于 1 mg·L^{-1}（表 1）。

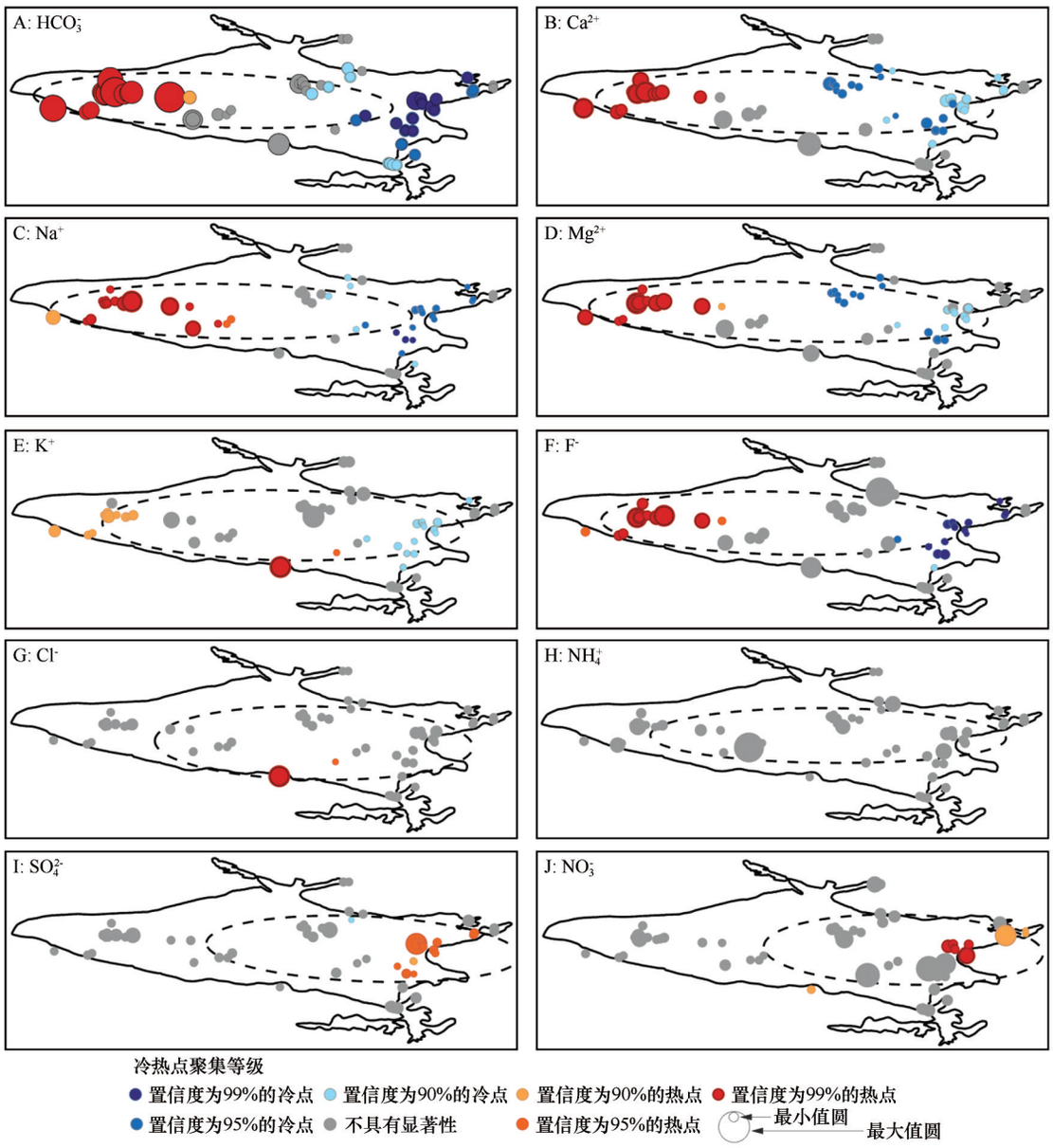
4　讨论

4.1　气候对地表沉积物易溶盐的影响

浑善达克沙地东、西部气候差异显著，降水量和蒸发量具有明显的经度地带性（图 1B~C），对地表沉积物易溶盐 10 种离子含量与其所在经度之间的关系进行分析发现（图 5），I类易溶盐离子含量与经度之间具有较强的相关性，而II类和III类易溶盐离子含量与经度之间的相关性较差，表明I类易溶盐离子的空间分布可能受蒸发和降水等气候因子的影响。

为了进一步明确两者的关系，分别以样品所在地区的多年平均降水量（1995—2024 年）和多年平均年蒸散发（1995—2024 年）为横坐标、易溶盐各离子的含量为纵坐标绘制双变量图。相关数据分别提取自国家地球系统科学数据中心（http://loess.geodata.cn）1901—2024 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集和 1901—2024 年中国 1 km 分辨率逐月潜在蒸散发数据集。I类易溶盐离子的含量与多年平均降水量负相关，而与多年平均蒸散发量正相关，而II类和III类易溶盐离子的含量与多年平均降水量和蒸散发量之间没有明显的相关性（图 6 和图 7）。上述分析与冷热点及标准差椭圆分析显示的易溶盐离子的空间分布格局一致（图 4），表明不同类型的易溶盐离子对降水和蒸发的响应不同，气候对易溶盐离子的影响具有选择性，I类易溶盐离子对气候的响应最敏感。另外，即使在I类易溶盐离子中，不同离子对气候因素的响应程度也不相同，易溶盐主要离子 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 与降水和蒸散发的相关性最高，Na^+、Mg^{2+}、F^- 与降水和蒸散发的相关性较低，而 K^+ 与这两个气候要素的相关性最低。

在更大的空间范围内，气候要素与地表沉积物易溶盐含量之间也存在类似的关系。例如，中国北方沙漠地表沉积物易溶盐的含量具有自西向东逐渐降低的分布特征[18,20]，这种分布规律与降水和蒸发这两个气候要素密切相关[34]。中国的沙漠/沙地自西向东降水量逐渐增多、蒸发量逐渐减少，这种梯度性的变化导致区域地表沉积物淋溶过程增强、强蒸发过程减小，地表沉积物易溶盐含量也相应降



注：圆的直径大小表示各离子的含量。因不同离子含量差异较大，故进行了归一化处理，用最小值圆表示各离子含量的最小值，用最大值圆表示各离子含量的最大值

图4 易溶盐10种离子冷热点及标准差椭圆空间分布格局

Fig.4 Cold-hot spots and standard deviational ellipse distribution of ten soluble salt ions

低[20]。为了明确降水、蒸发和易溶盐的关系，结合已发表的数据绘制TDS-气候要素双变量图（图8），其中横坐标为地表沉积物易溶盐的TDS值，纵坐标为样品所在地区的多年平均年降水量（1995—2024年）和多年平均年蒸散发（1995—2024年），相关气候数据来源于国家地球系统科学数据中心。

包括浑善达克沙地在内的中国北方多个沙漠地表沉积物易溶盐的含量与其所在区域的多年平均年降水量负相关，而与多年平均年蒸散发正相关，且均呈对数分布（图8）。后者的R^2远高于前者，说明在干旱-半干旱区，蒸散发对地表沉积物易溶盐的影响大于降水。此外，这种非线性关系表明，降水-蒸散发对地表沉积物易溶盐的耦合作用受到一定阈值的限制。当区域降水量>200 mm、蒸散发<950 mm时，易溶盐的TDS较小，可能与较强的淋溶作用导致易溶盐无法累积有关，如位于该范围的浑善达克沙地；而随着降水量持续减少、蒸散发不断增大，易溶盐的TDS迅速增大，对易溶盐而言，蒸散发作用大于淋溶作用，如位于该范围的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库姆塔格沙漠和塔克拉玛干

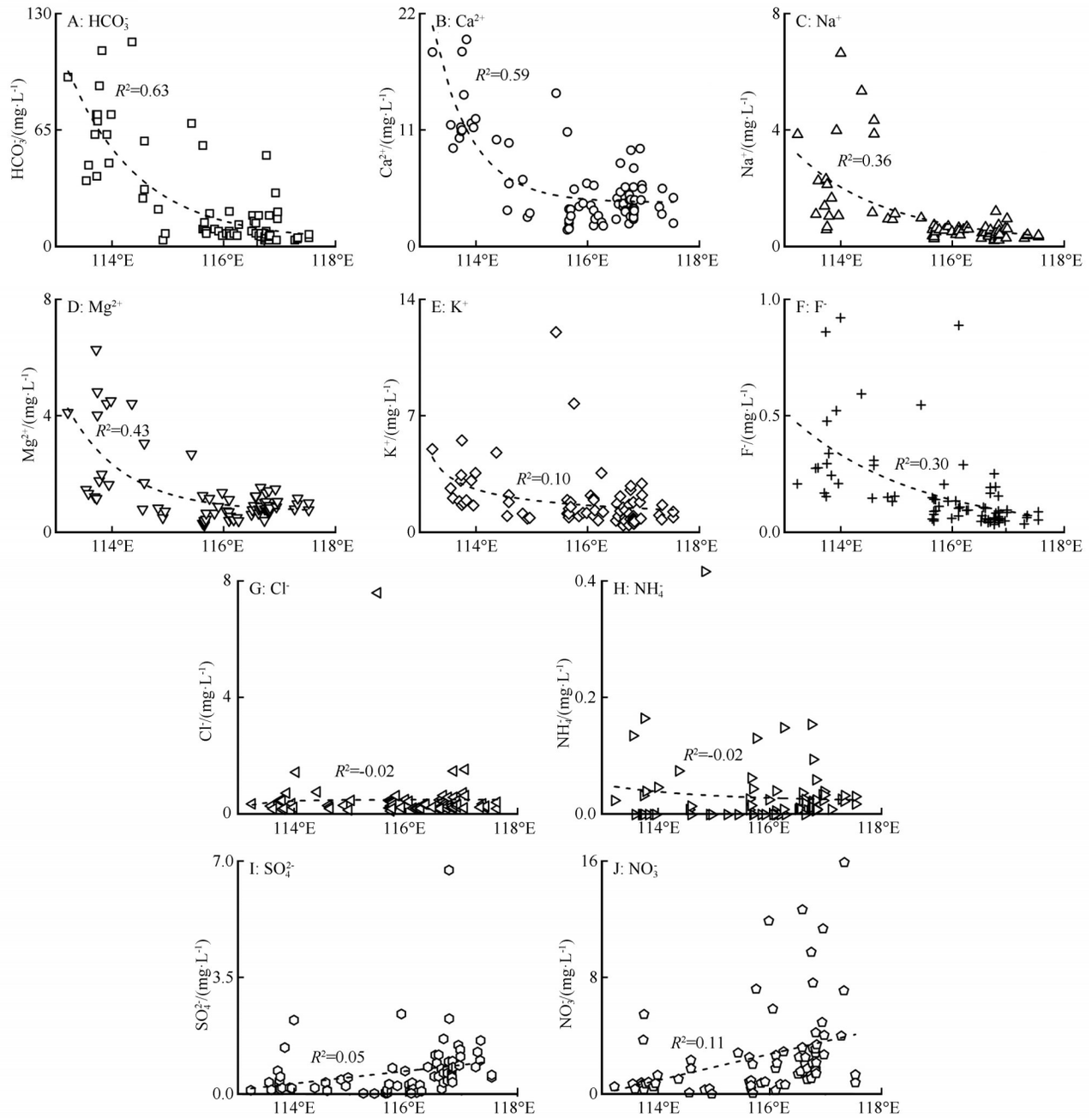


图 5　经度与地表沉积物 10 种易溶盐离子含量的关系

Fig.5　Correlations between longitude and contents of ten soluble salt ions

沙漠。类似的情况也出现在以色列，Pariente[35]发现，降水量与以色列表土易溶盐的含量存在非线性关系，且存在类似的阈值，当年均降水量大于 200 mm 时，降水对土壤易溶盐含量的影响不明显，而当年均降水量小于 200 mm 时，降水对土壤易溶盐含量的影响显著增加。

4.2　人类活动对地表沉积物易溶盐的影响

相对于中国西部塔克拉玛干等沙漠，浑善达克沙地具有相对丰富的降水量和较低的蒸散发量（图 8），且植被覆盖度较高，人类活动对区域环境的影响也相应增强，在沙地东部，NO_3^- 成为易溶盐中占比较高的主要离子。Cl^-/Na^+ 和 NO_3^-/Na^+ 常用来判断水体是否受到人类活动导致的污染影响。当水体受污染时，Cl^-/Na^+ 和 NO_3^-/Na^+ 通常大于 1[36]。在 Cl^-/Na^+ 和 NO_3^-/Na^+ 双变量图中（图 9A），多数地表沉积物易溶盐样品的 $Cl^-/Na^+<1$，但是多数阿列金II、III型样品的 $NO_3^-/Na^+>1$，这类样品以位于植被覆盖情况较

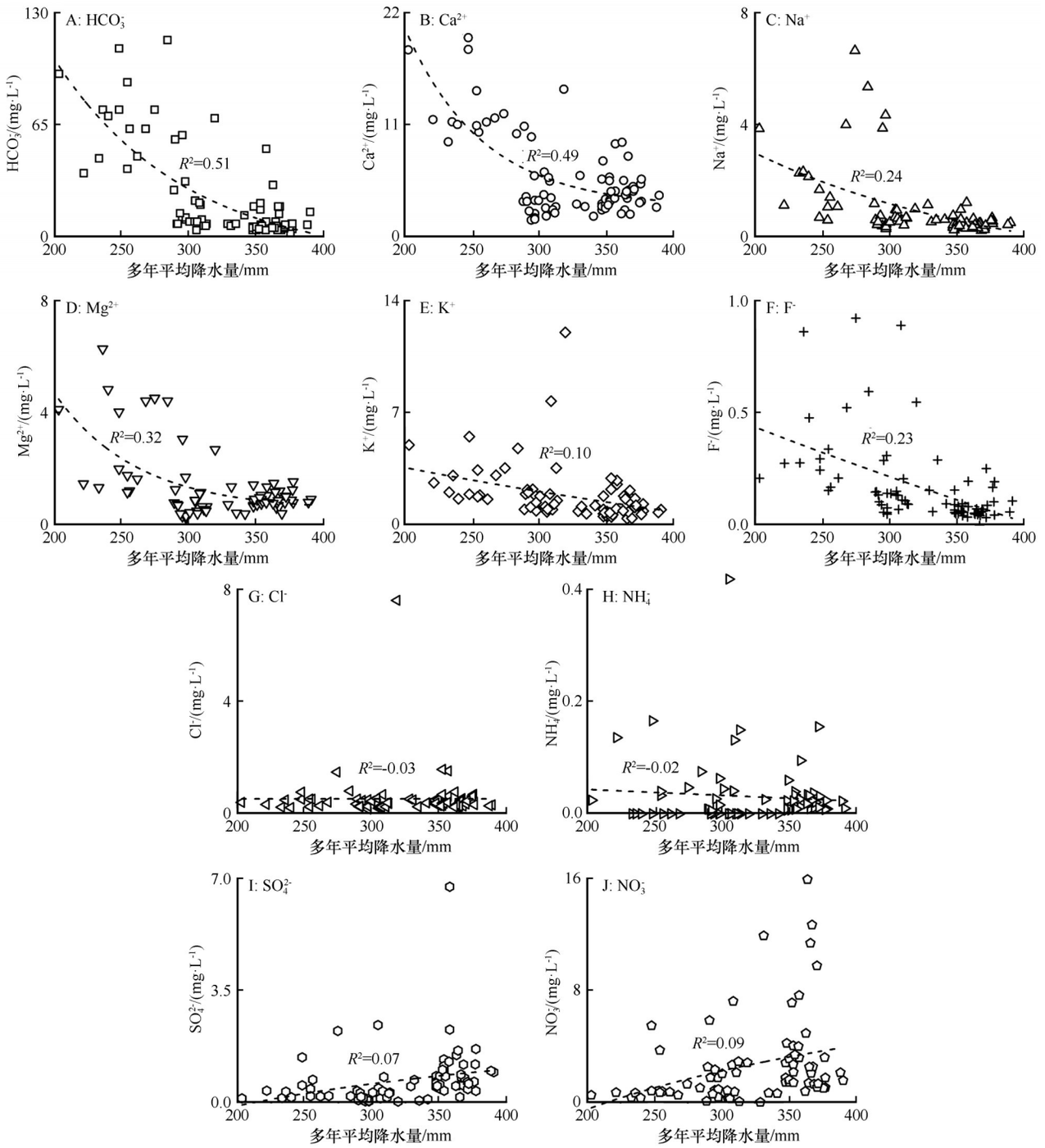


图6 多年平均降水量与10种易溶盐离子含量的关系

Fig.6 Correlations between annual mean precipitation and contents of ten soluble salt ions

好的沙地东部为主,该结果与NO_3^-的冷热点及标准差椭圆分析结果一致(图4)。在自然界中,NO_3^-因易被植物吸收而含量较低,但当受到人类活动如畜牧业、农业、大气污染等影响时,NO_3^-会显著升高[37-41]。浑善达克沙地远离工业区,大气降水中的NO_3^-含量较低[42],且高NO_3^-样品多呈点状分布于沙地东部,这与沙地东部植被覆盖[43]及多年平均年末牲畜头数密度(2009—2019年)高于西部的格局一致(图10)。畜牧业产生的排泄物能显著提高土壤中的NO_3^-[44],并在畜牧点周围大量聚集,污染地表沉积物。沙地东部降水相对丰富,在降水的淋溶作用下,NO_3^-可污染地下水。这与该地区地下水中NO_3^-含量通常大于地表水,部分样品中的NO_3^-甚至成为优势阴离子[45]的现象一致,表明导致地表沉积物易

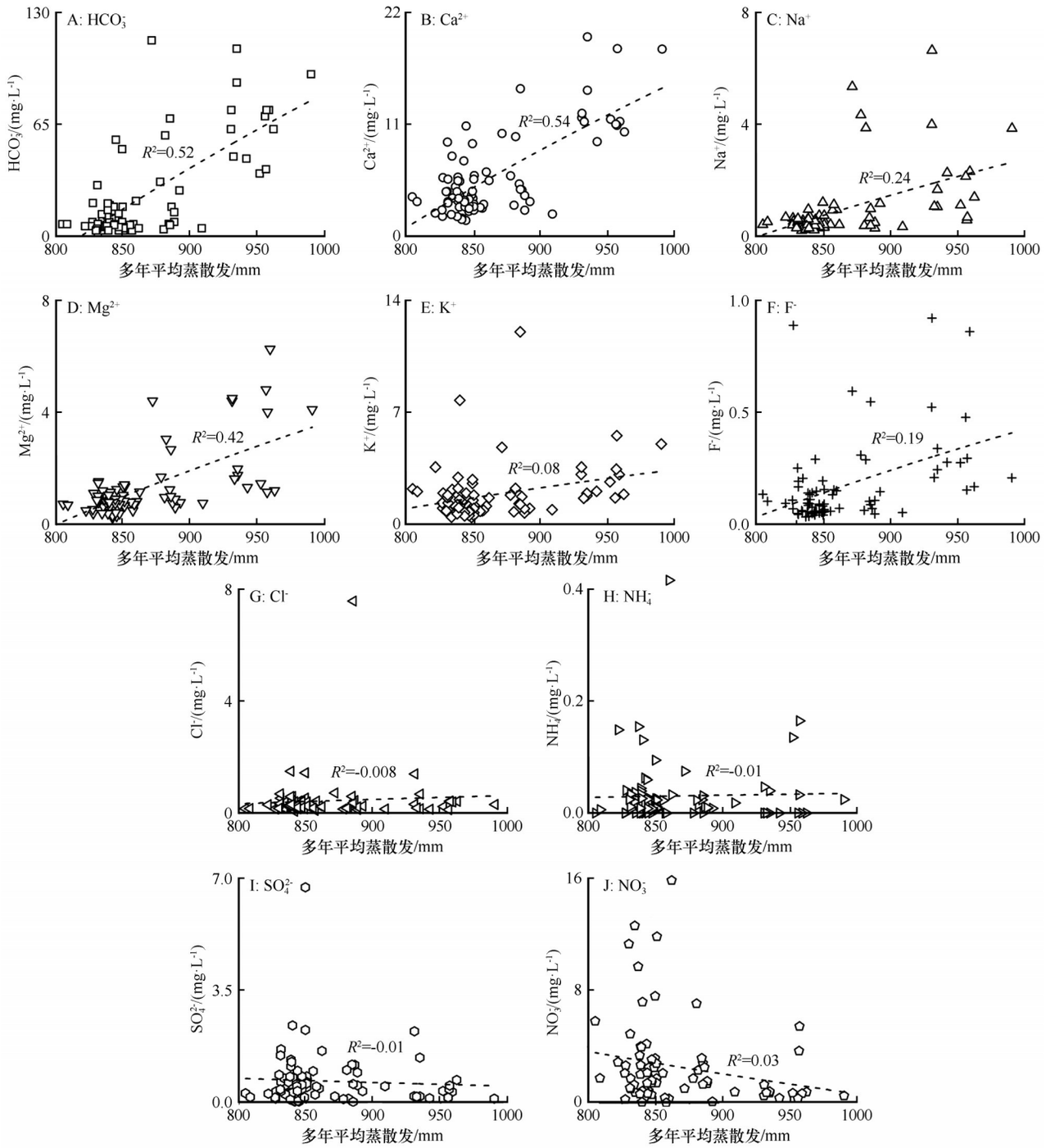


图 7　多年平均蒸散发与 10 种易溶盐离子含量的关系

Fig.7　Correlations between annual mean evapotranspiration and contents of ten soluble salt ions

溶盐中 NO_3^- 含量较高的原因应主要与畜牧活动有关[22]。

SO_4^{2-} 作为另一个II类易溶盐离子，其空间分布特征与 NO_3^- 在冷热点分布格局和空间集聚特征方面具有很多共同之处（图 4）。为确定 SO_4^{2-} 是否也受到人类污染的影响，采用 Cl^-/Na^+ 和 SO_4^{2-}/Na^+ 双变量图进行判断。当水体受到污染时，通常 Cl^-/Na^+ 和 SO_4^{2-}/Na^+ 大于 1[36]。然而多数浑善达克沙地地表沉积物易溶盐样品的 Cl^-/Na^+ 和 SO_4^{2-}/Na^+ 小于 1（图 9B），表明其 SO_4^{2-} 并非主要由人类污染所致。相比 NO_3^- 含量最高可达 15.90 mg·L^{-1}，多数样品的 SO_4^{2-} 含量小于 1（图 2 和表 1），表明人类活动对其影响有限，其可能还受易溶盐来源等其他因素的影响。

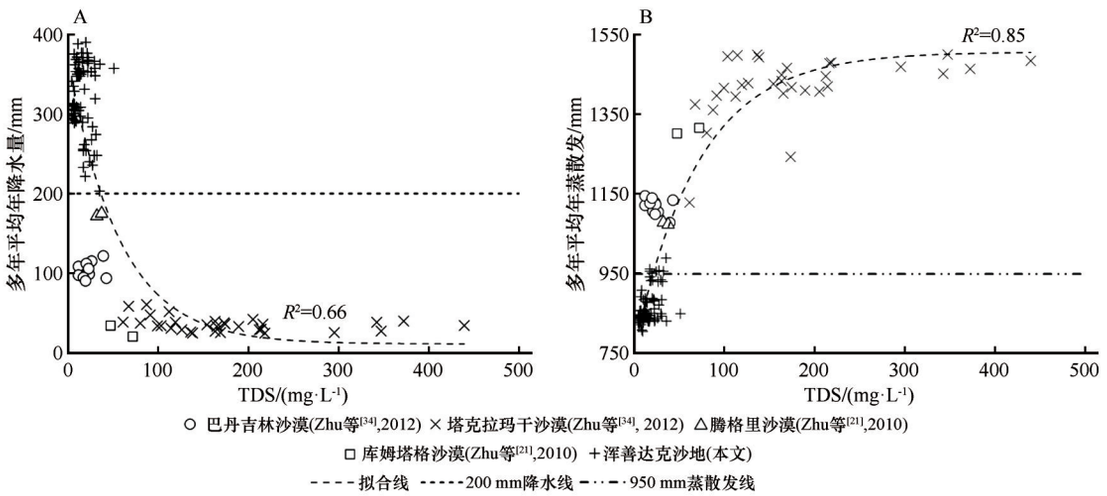


图8 沙漠地表沉积物易溶盐的TDS-气候要素双变量图

Fig.8 Bivariate relationship between TDS of soluble salt and climatic factors in surface desert sediments

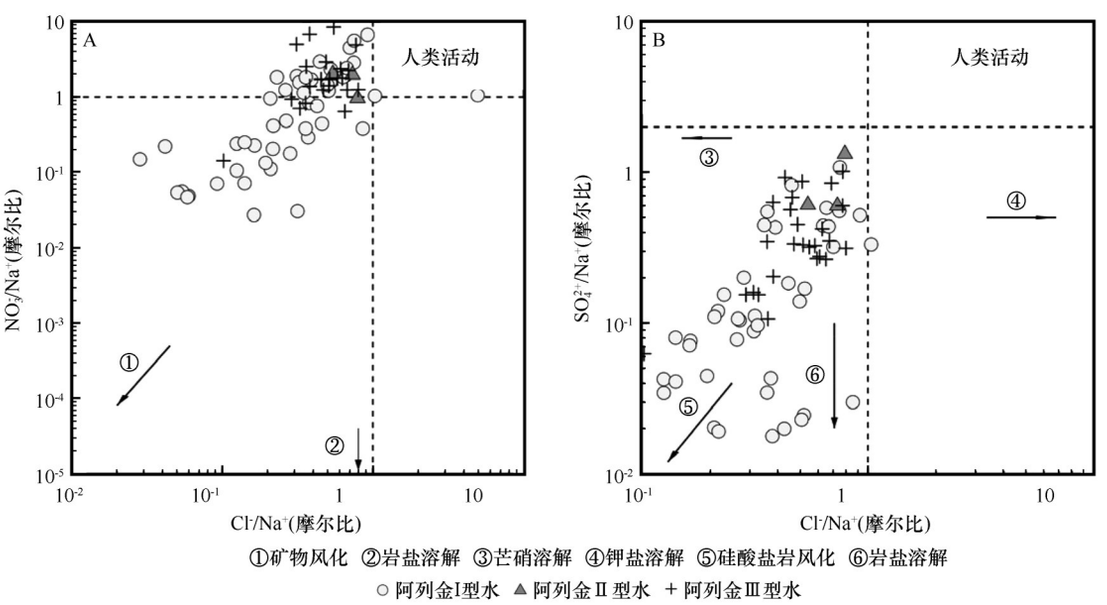
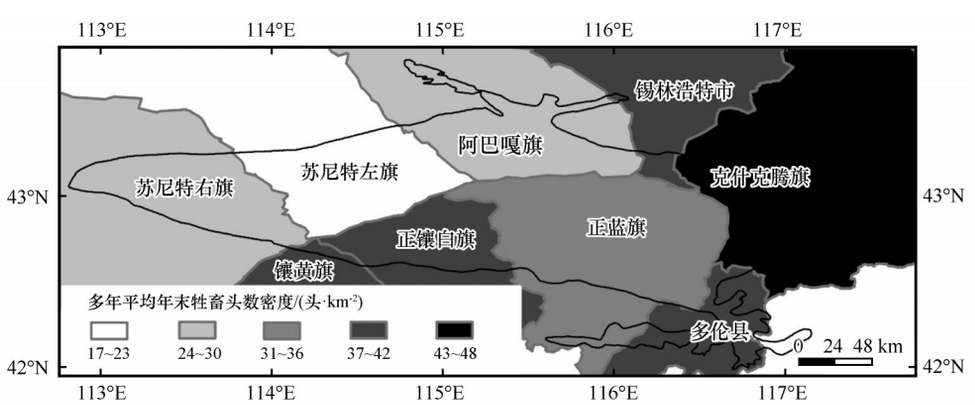


图9 易溶盐离子比值双变量图指示的人类活动情况

Fig.9 Human activities indicated by ion ratios of soluble salts in bivariate diagrams



注：多年平均年末牲畜头数密度（2009—2019年）基于历年《锡林浩特市统计年鉴》和《赤峰市统计年鉴》

图10 多年平均年末牲畜头数密度分布格局（2009—2019年）

Fig.10 Distribution pattern of year-end livestock density (2009-2019)

4.3　地表沉积物易溶盐的来源

除III类易溶盐离子中的NO_3^-主要来源于人类活动导致的污染外，其他各类离子的来源并不相同。其中，在受NO_3^-污染较小的样品中，HCO_3^-和Ca^{2+}是占主导地位的阴、阳离子，其通常来自干旱环境下常见的方解石和白云石等碳酸盐岩的溶解，此时$Ca^{2+}+Mg^{2+}$与HCO_3^-的当量浓度比接近1∶1[46]。浑善达克沙地地表沉积物易溶盐中的阿列金I型样品主要分布在$Ca^{2+}+Mg^{2+}$与HCO_3^-当量浓度比1∶1线附近，表明其$Ca^{2+}+Mg^{2+}$与HCO_3^-主要来源于各类碳酸盐岩的溶解；而阿列金II、III型样品则位于该1∶1线下方（图11A），其$Ca^{2+}+Mg^{2+}$相对HCO_3^-富集，盈余的$Ca^{2+}+Mg^{2+}$最有可能被NO_3^-平衡。这是因为，阿列金II型及多数阿列金III型样品的NO_3^-含量较高，盈余的$Ca^{2+}+Mg^{2+}$与NO_3^-可形成溶解度较高的化合物，因此$Ca^{2+}+Mg^{2+}$与$HCO_3^-+NO_3^-$的当量浓度比值应接近1∶1，这与观察到的结果一致（图11B），然而仍有部分样品位于该等值线以下，表明还有其他阴离子参与了对$Ca^{2+}+Mg^{2+}$的平衡。此外，碳酸盐岩溶解中方解石和白云石的比例一般可由Mg^{2+}/Ca^{2+}确定[47]，在SO_4^{2-}/Ca^{2+}与Mg^{2+}/Ca^{2+}双变量图中（图11C），浑善达克沙地地表沉积物易溶盐样品主要集中在方解石+白云石溶解区域，表明方解石和白云石溶解共同构成了Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^-的主要来源。

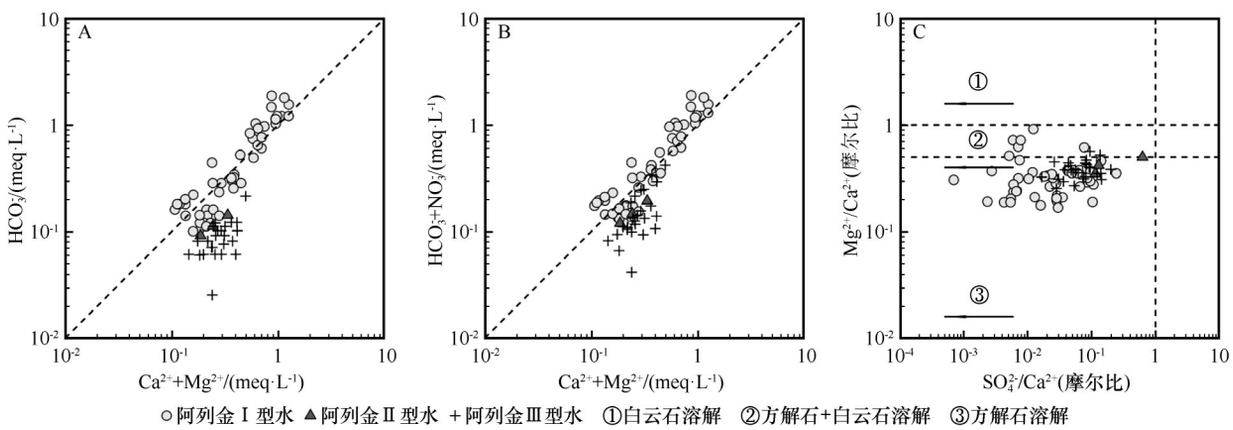


图11　易溶盐离子/离子比值双变量图指示的Ca^{2+}、Mg^{2+}与HCO_3^-的来源

Fig.11　Sources of Ca^{2+}, Mg^{2+} and HCO_3^- indicated by ions /ion ratios of soluble salts in bivariate diagrams

除碳酸盐岩溶解和人为污染源外，其他非主要离子最有可能来自粉尘、降水和岩石风化[21]，包括少量主要离子也与粉尘和降水有关。浑善达克沙地是亚洲粉尘向东输出的重要途经地，这些主要来自塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠的粉尘，约4%~14%为易溶盐，主要包括SO_4^{2-}、Cl^-、Na^+和Ca^{2+}[5]，成为浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的重要潜在外部输入源。此外，浑善达克沙地本地的湖相沉积物和干湖床则构成其地表沉积物易溶盐的重要内部输入源。地质时期的浑善达克沙地分布着面积广阔的古湖泊，包括覆盖浑善达克沙地西部的末次间冰期古大湖[48]，以及4.2 ka时期面积远大于现代规模的古达里湖[49]，这些古湖干涸后均留下大量富含易溶盐的古湖相沉积物。近年来，分布在浑善达克沙地的现代湖泊呈现明显的干旱化趋势，湖泊面积显著萎缩[50]，干涸、半干涸湖泊留下大量富含易溶盐的干湖床[22]，与亚洲粉尘共同构成了浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的内、外输入源。撒哈拉沙漠在10~5 ka BP经历了类似的古大湖时期，由盐湖沉积物发育而成或地处低洼区域的土壤，其易溶盐含量通常较其他地方高很多，土壤母质来源及地貌部位是其易溶盐的主要控制因素[51]。此外，降水中富含各类易溶盐离子，其中来自人类污染源的SO_4^{2-}、F^-、NO_3^-、NH_4^+占比较高，而Mg^{2+}、K^+、和Ca^{2+}则主要来自于陆壳[52]，浑善达克沙地降水中普遍含有上述离子[42]，是构成其地表沉积物易溶盐的重要来源。而对于距离海洋较近的沙漠，如内盖夫沙漠，海洋水汽中的海盐飞沫对当地沉积物易溶盐的组成具有重要影响，NaCl在其组成中占有重要地位[7]。此外，图9B显示，浑善达克沙地多数易溶盐样品具有$Cl^-/Na^+<1$的特点，表明Na^+相对Cl^-盈余，盈余的Na^+来源于硅酸盐岩风化。浑善达克沙地地表沉积物中长石等硅酸盐岩占比较高[53]，在合适的条件下发生化学风化可生成Na^+。

5 结论

浑善达克沙地地表沉积物易溶盐的TDS较低，HCO_3^-和Ca^{2+}的含量均大于1 mg·L^{-1}，F^-和NH_4^+的含量均小于1 mg·L^{-1}，其他离子的含量介于上述两类离子之间。沙地不同区域地表沉积物易溶盐的差异显著，沙地西部地表沉积物易溶盐以HCO_3^-、Ca^{2+}为主，NO_3^-的含量较低，属阿列金水化学分类法重碳酸盐和碳酸盐类、钙质组、I型水；由于人类活动的影响，沙地东部NO_3^-的含量明显增加，属阿列金水化学分类法重碳酸盐和碳酸盐类、钙质组、II和III型水。

根据易溶盐各离子的空间分布特征，可将其分为3类。I类易溶盐离子包括HCO_3^-、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、K^+和F^-，其空间集聚特征显著，冷、热点区分别分布在沙地东、西部，离子含量西高东低，标准差椭圆重心位于沙地中部；II类易溶盐离子包括Cl^-和NH_4^+，空间集聚特征不显著，离子含量较低，标准差椭圆重心较I类易溶盐离子偏东；III类易溶盐离子包括SO_4^{2-}和NO_3^-，冷、热点区与I类易溶盐离子相反，东部热点区表现为多点高值集聚，西部冷点区以不显著为特征，离子含量东高西低，标准差椭圆重心较前两者更偏东。

影响易溶盐主要离子HCO_3^-、Ca^{2+}和NO_3^-空间分布的因素并不相同，其中包括HCO_3^-和Ca^{2+}在内的I类易溶盐离子受气候因素蒸发和降水的影响显著，与多年平均降水量负相关，而与多年平均蒸散发量正相关，尤其以HCO_3^-和Ca^{2+}与降水和蒸散发的相关性最高。NO_3^-的分布主要与人类畜牧活动有关，受畜牧点分布格局等非自然因素的影响较大。此外，HCO_3^-和Ca^{2+}主要来源于碳酸盐岩的溶解，而NO_3^-来源于人为污染，影响Cl^-、NH_4^+、SO_4^{2-}等其他非主要离子的来源较复杂，受包括粉尘、降水和硅酸盐岩风化。

致谢：感谢国家地球系统科学数据共享服务平台-黄土高原科学数据中心（http://loess.geodata.cn）和资源环境科学数据平台（https://www.resdc.cn/）提供数据支撑。感谢高育方协助整理基础数据，在此谨表谢意。

参考文献：

[1] Li C, Ji H. Chemical weathering and the role of sulfuric and nitric acids in carbonate weathering: Isotopes (^{13}C, ^{15}N, ^{34}S, and ^{18}O) and chemical constraints[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(5): 1288-1305.

[2] Liu J, Han G. Major ions and $\delta^{34}S_{SO4}$ in Jiulongjiang River water: Investigating the relationships between natural chemical weathering and human perturbations[J]. Science of The Total Environment, 2020, 724: 138208.

[3] 刘东生，等. 黄土与环境[M]. 北京：科学出版社，1985.

[4] Griffin D W, Kellogg C A. Dust storms and their impact on ocean and human health: dust in Earth's atmosphere[J]. EcoHealth, 2004, 1(3): 284-295.

[5] Li W, Zhou Y, Zhang W, et al. A Review of water-soluble ions in natural dust particles over east Asia: abundance, spatial distributions, and implications[J]. ACS ES&T Air, 2025, 2(8): 1379-1393.

[6] Goudie A S, Middleton N J. Desert Dust in the Global System[M]. Berlin, Germany: Springer, 2006.

[7] Breckle S W, Yair A, Veste M. Arid Dune Ecosystems: The Nizzana Sands in the Negev Desert[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.

[8] Salem M A. Evaluation of salinity in some soils of irrigated Brack-Ashkada agriculture project, Fezzan, Libya[J]. IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science, 2013, 2(1): 5-9.

[9] Maryol E, Lin C. Evaluation of atmospheric CO_2 sequestration by alkaline soils through simultaneous enhanced carbonation and biomass production[J]. Geoderma, 2015, 241: 24-31.

[10] Marion G, Verburg P, Mcdonald E, et al. Modeling salt movement through a Mojave Desert soil[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(6): 1012-1033.

[11] Bourrié G. Salts in deserts[M]//Joly F, Bourrié G. Mankind and Deserts 2: Water and Salts. London, UK: ISTE Ltd, 2021.

[12] Marion G M, Verburg P S J, Stevenson B, et al. Soluble element distributions in a Mojave Desert soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1815-1823.

[13] Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes[M]. Berlin, Germany: Springer, 2009.

[14] Kocurek G, Carr M, Ewing R, et al. White sands dune field, New Mexico: age, dune dynamics and recent accumulations[J]. Sedimentary Geology, 2007, 197(3/4): 313-331.

[15] Glamoclija M, Ramirez S, Sirisena K, et al. Subsurface microbial ecology at sediment-groundwater interface in sulfate-rich Playa, White Sands National Monument, New Mexico[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2595.

[16] Voigt C, Klipsch S, Herwartz D, et al. The spatial distribution of soluble salts in the surface soil of the Atacama Desert and their relationship to hyperaridity[J]. Global and Planetary Change, 2020, 184: 103077.

[17] 朱震达，吴正，刘恕，等. 中国沙漠概论[M]. 北京：科学出版社，1980.

[18] 郭志清. 我国沙漠地区沙丘的易溶盐含量分布特征[J]. 中国沙漠，1987，7(4)：53-65.

[19] 赵文智，荔克让，何欣东. 我国不同地带沙地盐分特征研究

[J].地理科学,1995,15(4):315-320.

[20] 朱秉启,杨小平,Rioual P,等.沙漠风成沙的可溶盐组成及其环境意义[J].第四纪研究,2011,31(6):1029-1044.

[21] Zhu B, Yang X. The origin and distribution of soluble salts in the sand seas of northern China[J].Geomorphology, 2010, 123(3/4):232-242.

[22] 任孝宗,杨小平.浑善达克沙地沉积地层易溶盐的组成特征及其影响因素[J].中国沙漠,2026,46(2):177-187.

[23] 杨小平,梁鹏,张德国,等.中国东部沙漠/沙地全新世地层序列及其古环境[J].中国科学:地球科学,2019,49(8):1293-1307.

[24] Ren X, Zhu B, Liu M, et al. Mechanism of groundwater recharge in the middle-latitude desert of eastern Hunshandake, China: diffuse or focused recharge?[J].Hydrogeology Journal, 2019,27(2):761-783.

[25] Yang X, Wang X, Liu Z, et al. Initiation and variation of the dune fields in semi-arid China: with a special reference to the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia[J].Quaternary Science Reviews,2013,78:369-380.

[26] 靳鹤龄,苏志珠,孙良英,等.浑善达克沙地全新世气候变化[J].科学通报,2004,49(15):1532-1536.

[27] Yang X, Li H, Conacher A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China[J].Quaternary International,2012,250:74-83.

[28] Yang X, Zhu B, Wang X, et al. Late Quaternary environmental changes and organic carbon density in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J].Global and Planetary Change,2008,61(1/2):70-78.

[29] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.

[30] 孙宏日,刘艳军,周国磊.东北地区交通优势度演变格局及影响机制[J].地理学报,2021,76(2):444-458.

[31] 郭向阳,穆学青,丁正山,等.长三角多维城市化对$PM_{2.5}$浓度的非线性影响及驱动机制[J].地理学报,2021,76(5):1274-1293.

[32] 任孝宗.水化学图形表达方法、MATLAB实现及在天然水体中的应用[M].西安:西安交通大学出版社,2021.

[33] Appelo C a J, Postma D. Geochemistry, Groundwater and Pollution[M].Amsterdam, Netherlands: Taylor & Francis, 2005.

[34] Zhu B, Yang X, Liu Z, et al. Geochemical compositions of soluble salts in aeolian sands from the Taklamakan and Badanjilin deserts in northern China, and their influencing factors and environmental implications[J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66(1):337-353.

[35] Pariente S. Soluble salts dynamics in the soil under different climatic conditions[J].Catena, 2001, 43(4):307-321.

[36] Rao W, Jin K, Jiang S, et al. Chemical and strontium isotopic characteristics of shallow groundwater in the Ordos Desert Plateau, North China: implications for the dissolved Sr source and water-rock interactions[J]. Chemie der Erde, 2015, 75(3): 365-374.

[37] Zhang Y, Xu W, Wen Z, et al. Atmospheric deposition of inorganic nitrogen in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, China[J].Journal of Arid Land, 2017, 9(6):810-822.

[38] Feng H, Dong S, Li Y, et al. Characterizing nitrogen distribution, source and transformation in groundwater of ecotone of agriculture-animal husbandry: an example from North China[J].Environmental Earth Sciences, 2020, 79(6):133.

[39] Tagma T, Hsissou Y, Bouchaou L, et al. Groundwater nitrate pollution in Souss-Massa basin (south-west Morocco)[J].African Journal of Environmental Science and Technology, 2009, 3(10):301-309.

[40] Zhang C, Qiong W, Peng L. Investigations on nitrate pollution of soil, groundwater and vegetable from three typical farmlands in Beijing region, China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(3):423-430.

[41] Hakeem K R, Sabir M, Ozturk M, et al. Nitrate and nitrogen oxides: sources, health effects and their remediation[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 242: 183-217.

[42] 任孝宗.浑善达克沙地天然水体的水化学及水-沙相互作用研究[D].北京:中国科学院大学, 2014

[43] 马永桃,任孝宗,胡慧芳,等.基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J].中国沙漠,2021,41(4):195-204.

[44] Ma X, Wang S, Jiang G, et al. Short-term effect of targeted placements of sheep excrement on grassland in Inner Mongolia on soil and plant parameters[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(11/12):1589-1604.

[45] 任孝宗,李建刚,刘敏,等.浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J].干旱区研究,2019,36(4):791-800.

[46] Alezabawy A K, Eissa M, Salem Z E-S. Hydrogeochemical and isotopic investigations of groundwater in the reclaimed desert located between EL Nasr canal and Mariut Tableland, NW Coast, Egypt[J].Scientific Reports, 2024, 14(1):21172.

[47] Rao W, Han G, Tan H, et al. Chemical and Sr isotopic characteristics of rainwater on the Alxa Desert Plateau, North China: Implication for air quality and ion sources[J]. Atmospheric Research, 2017, 193:163-172.

[48] Li H, Yang X, Scuderi L A, et al. East Gobi megalake systems reveal East Asian Monsoon dynamics over the last interglacial-glacial cycle[J].Nature Communications, 2023, 14(1):2103.

[49] Yang X, Scuderi L A, Wang X, et al. Groundwater sapping as the cause of irreversible desertification of Hunshandake Sandy Lands, Inner Mongolia, northern China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(3):702-706.

[50] 白雪梅,春喜,斯琴毕力格,等.近45a内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化[J].湖泊科学,2016,28(5):1086-1094.

[51] Maryol E, Lin C. Geochemical characteristics of soils in Fezzan, Sahara desert: Implications for environment and agriculture[J].Journal of Geochemical Exploration, 2015, 158:122-131.

[52] Li R, Cui L, Zhao Y, et al. Wet deposition of inorganic ions in 320 cities across China: spatio-temporal variation, source ap-

portionment, and dominant factors[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(17): 11043-11070.

[53] Liu Z, Yang X. Geochemical-geomorphological Evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 871-884.

Spatial distribution of soluble salts in surface sediments of Hunshandake Sandy Land and its influencing factors

Ren Xiaozong[ab], Cui Xujia[ab], Qin Yanzhi[a], Chen Tianjing[a], Cui Wenxi[a]

(a. *School of Geography Science* / b.*Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecological Security in Fenhe River Basin*, *School of Geography Science*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong* 030619, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Soluble salts in surface sediments of deserts and sandy lands exert profound impacts on regional rock weathering and global salt cycling, and also act as a critical trigger for soil salinization. Their spatial distribution patterns are primarily governed by climatic factors. Nevertheless, the dominant controlling factors remain unclear for sandy lands in eastern China that experience intense human activities. In this study, hydrochemical parameters and ten major ions were measured from 78 surface sediment samples collected in the Hunshandake Sandy Land. Cold-hot spot analysis, standard deviational ellipse and bivariate plots were adopted to explore the spatial distribution patterns and influencing factors of various ions. The results show that the average total dissolved solids and pH value are 15.61 $mg \cdot L^{-1}$ and 5.88 respectively. The water chemistry belongs to the bicarbonate-carbonate type and calcium group classified by Alekin method. Obvious spatial differentiation of soluble salts exists between the western and eastern parts of the sandy land. The western area is dominated by HCO_3^- and Ca^{2+} with low NO_3^- concentration, corresponding to Alekin Type I water. Influenced by human activities, NO_3^- content rises distinctly in the eastern region, which is categorized as Alekin Type II and Type III water. All soluble ions are classified into three groups based on spatial distribution characteristics. Group I consists of HCO_3^-, Ca^{2+}, Na^+, Mg^{2+}, K^+ and F^-, with cold and hot spots distributed across the western and eastern sandy land. Group II includes Cl^- and NH_4^+, showing insignificant cold-hot spot differentiation. Group III comprises SO_4^{2-} and NO_3^-, whose cold and hot spots present an opposite distribution pattern to Group I. The gravity center of standard deviational ellipses shifts gradually eastward from Group I to Group II and Group III. Climatic factors primarily control the spatial distribution of Group I ions including HCO_3^- and Ca^{2+}, while NO_3^- is strongly affected by livestock breeding activities. Major ions HCO_3^- and Ca^{2+} derive from carbonate rock dissolution, NO_3^- originates from anthropogenic pollution, and other minor ions are sourced from atmospheric dust, precipitation and silicate rock weathering.

Key words: Hunshandake Sandy Land; surface sediment; soluble salts; hydrochemistry; influencing factors