



地球化学环境

—— 农业 · 健康

中国地质科学院生物环境地球化学研究中心 编



地质出版社

地球化学环境

——农业·健康

中国地质科学院生物环境地球化学研究中心 编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本文集包括论文 19 篇, 主要涉及地球化学元素的背景、赋存形态与环境的关系研究, 地球化学元素与农作物生长和疾病的关系, 某些有害元素的致病机理研究, 氨害形成的机理及应用等。这些论文大部分为“九五”国家科技攻关项目的成果, 在环境地球化学领域研究方面有新的突破。

可供地球化学、环境科学、农业、公共卫生学等学科的科技工作者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球化学环境: 农业·健康/中国地质科学院生物环境地球化学研究中心编. - 北京: 地质出版社, 2001. 8

ISBN 7-116-03445-5

I. 地... II. 中... III. ①地球化学环境-关系-农业-研究-文集 ②地球化学环境-关系-健康-研究-文集 IV. X21-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 047877 号

责任编辑: 江晓庆 史欣然

责任校对: 田建茹 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 29 号, 100083

电 话: 82324508 (邮购部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: 010-82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10.25

字 数: 250000

印 数: 1~800 册

版 次: 2001 年 8 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 25.00 元

ISBN 7-116-03445-5/P·2203

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行处负责调换)

目 录

区域地球化学特征及其农业和健康效应	李家熙 吴功建 黄怀曾 刘晓端	(1)
地球科学研究的一个新方向	吴功建 李家熙 黄怀曾	(14)
区域地质、自然地理与地球化学	黄怀曾 颜秉刚 饶克勤	(19)
湖北恩施硒中毒区土壤硒的分布及其控制因素	张光弟 张绮玲 葛晓立等	(29)
张家口地区硒的环境地球化学背景	葛晓立 张光弟 张绮玲等	(34)
磁县食管癌与微量元素	张绮玲 张光弟 葛晓立等	(45)
硒环境与人体健康信息检索系统	罗代洪 张光弟 张绮玲等	(58)
地方性硒中毒预防智能决策支持系统的研究	罗代洪	(62)
土壤中硒的形态及其有效性	黄怀曾 刘晓端 张玲金等	(71)
环境中氡气的来源及其防护	胡省英 刘庆成 朱 立	(80)
地下水中氡浓度水平与辐射危害	刘庆成 朱 立 胡省英	(89)
室内氡浓度的影响因素及控制对策	尚 兵 朱 立 任天山 李家熙	(93)
室内氡变化的理论分析	刘庆成 朱 立 胡省英	(102)
云南个旧地区氡地质填图初探	朱 立 唐 莉 胡省英等	(108)
黄精和玉竹微量元素含量及药物功效	张玲金	(116)
北京市密云县低锌、硼地区微肥增产试验	曾太文 周绍林 周亚男	(124)
燃煤型氟中毒的背景、成因与致病因素研究	刘晓端 曾太文 李 奇等	(131)
天然碘矿泉水与妇女和儿童健康	刘晓端 李 奇 房珂玮等	(145)
区域地球化学与农业和生命科学关联性数据处理系统简介	陈 明 吴锡生	(156)

区域地球化学特征及其农业和健康效应

李家熙 吴功建 黄怀曾 刘晓端

(中国地质科学院生物环境地球化学研究中心, 北京 100037)

摘 要 生命元素从岩石经水系沉积物、水、土壤直到动植物和人体内, 经历了漫长的迁徙输送过程。不同介质内生命元素的含量、赋存状态及其转化方式, 既受自然环境因素制约, 又受母源物质控制, 还受元素本身的习性行为约束。正是这些综合因素决定了区域地球化学特征。由于生命元素在区域上分布不均及其活度的差异, 影响了农业生产, 也滋生了一些地方性疾病。

在了解区域地球化学特征的基础上, 提出合理利用国土资源, 促进农业生产, 预防和控制地球化学病的若干措施。

关键词 区域地球化学 农业生产 地球化学病

1 元素地球化学分区及其区域分布特点

岩石物质组分受成因机制约束, 取决于它形成时的古环境和古地球动力学。水系沉积物属于地质大循环作用下岩石风化作用的产物, 它受物源、气候、地貌、水文条件等因素制约。显然, 以水系沉积物中硅酸盐矿物和元素组分所表征的区域地球化学特征是包括现今环境在内的综合因素的产物。围绕水系沉积物中矿物、元素的分布、迁移、富集特点, 综观我国水系沉积物的地球化学分区, 从西北到东南分以下几个区。

1.1 西北内陆地球化学区 (内陆区)

天山以北的准噶尔—北山—阿尔泰山区, 显示出古生代活动大陆边缘的沉积特点, 杂砂岩和硅质岩较为常见, 成分成熟度和结构成熟度较低。除表生作用下的 Ba、Sr 丰度较高外, 来自地壳深部的亲铁元素 Fe、Mn、Ti、V、Cr、Ni、Cu 含量也偏高, 而 Na、K、Mg、Pb 偏低。区内花岗岩、火山岩以活动大陆边缘型为主, 其次为海西晚期裂谷型的碱性岩, 另有少量基性岩和超基性岩。这几种岩类均有幔源物质渗入, 都反映了相对富集铁族元素, V、Cr、Co、Ni、Fe、Mn、Ti、Cu、Ca、Mg 含量较高, K、Na 相对偏低。

本区为 pH 值大于 8.5 的干旱氧化环境, 以物理风化作用为主, 硅酸盐矿物长石、云母等在多雨季节通过水合作用开始转为水云母、水绿泥石, Cl、S、I 大量析出, 积聚在风化壳、土壤和洼地中, 但 Ca、Mg、Na、K 流失不多, 与其他三个区相比, 水系沉积物中这类元素含量与母岩最为接近。

1.2 大兴安岭—藏北高原地球化学区 (高原区)

高原区除塔里木地台、冈底斯山和昆仑山岩浆弧外, 可能还有一些由裂隙活动构成的褶皱系。在冈底斯、昆仑和秦巴地区, 发育富集铁族元素的深熔花岗岩, 以及青海南部和

大兴安岭的幔源富重稀土元素的碱性岩浆岩。但高原区大范围内仍以富集大离子亲石元素和轻稀土元素的地壳内重熔型花岗岩为主。大兴安岭、昆仑、冈底斯等优地槽内发育火山质和长石质硬砂岩，唐古拉、北喜马拉雅冒地槽内堆积了岩屑质硬砂岩。在地台或地槽区常覆盖着一些陆相盆地沉积，新生的堆积物与原先的槽型沉积相比，铁族元素含量降低，碱金属、碱土金属和卤族元素含量增加。

区内 pH 值通常为 8.5~7.5，为半干旱带。硅酸盐矿物转变成水云母、拜来石、蒙脱石，氯化物、硫酸盐大部分溶解， Cl^- 和 SO_4^{2-} 淋失，游离出碱金属和碱土金属，Na 部分带出，Ca、Mg、K 部分保留在残积层中，并使一部分 SiO_2 转入溶液，常形成钙、镁碳酸盐堆积，以至水系沉积物中 Ca、Mg、Na、Sr 等含量下降。

1.3 东北三江（黑龙江、松花江和乌苏里江）、西南三江（怒江、澜沧江和金沙江）地球化学区（三江区）

三江区以华北地台和扬子地台为主体。地台区出露有古老的结晶基底，为最早期地幔未完全分异产物。古老变质岩系中常含基性和超基性岩透镜体，并有辉长岩墙贯入，平均物质组分偏向基性，Mg、Ca 及幔源组分明显偏高，大离子亲石元素 K、Na、B、Li 等含量相对偏低。在广泛出露的地台型海相沉积盖层中，稳定的石英砂岩和碳酸盐岩颇为发育，来自基底剥蚀残留下来的 P、Fe、V、Co、Ni、Mo、Cu 等元素，局部地区形成具有一定品位的 Fe、Al、Mn 等工业矿床。岩浆岩出露面积不超过 10%，其中二叠纪大陆拉斑玄武岩和新生代碱性玄武岩具有鲜明的幔源特色，与结晶基底的成分基本接近。

三江区处在 pH 值为 7.5~5.5 的半潮湿的弱酸性环境下，矿物中硅酸盐盐基几乎全部被溶解， SiO_2 进一步游离出来，碱金属和碱土金属强烈淋出流失， SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 以水合物形式沉淀下来，生成不含 K、Na、Ca 盐基的粘土矿物高岭石、埃洛石或构成氢氧化物。Ca、Mg、Na、Sr、K 含量继续下降。

1.4 东南沿海地球化学区（沿海区）

沿海区以拉张强度较弱的裂陷槽——华南褶皱系为主体。尽管区内岩浆岩出露面积较大，但深源岩浆活动十分微弱，亲铁元素低于相邻的三江区。最新的裂谷型第四纪幔源碱性玄武岩仅在有限区域内见及，不足以影响区内地壳表层的平均成分。壳源重熔型花岗岩使 W、Sn、Bi、Mo、Pb、Zn、Hg、As 等元素集聚，甚至形成大型和超大型矿床。裂陷槽内，很少见到快速堆积的粗碎屑物质，主要为细碎屑复理石沉积。由于它经受了较为充分的沉积分异作用，所以在物质迁移过程中，带入的是一定量的活动元素和过渡元素；弱活动和不活动元素更多地滞留在剥蚀区内，可能也是造成区内弱活动和不活动元素含量偏低的原因之一。

近海平原 pH 值一般小于 5.5，在还原环境下的潮湿带内，Ca、Mg、Na、K 均被游离出来带走，硅酸盐彻底分解， Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与 SiO_2 分离， SiO_2 大量淋失， Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和部分 SiO_2 呈胶体状，在酸性介质中聚集，生成水铝英石、褐铁矿及蛋白石。Ca、Mg、Na、Sr 含量降到最低水平。

元素的区域分布特点如下。

(1) Na、Ca、Mg、K、Al、F、P

这七种元素主要富集在上地壳内，其在地壳表层的总平均含量高于相应层位的铁族元素总平均含量。在它们自身的习性与行为支配下，Na、Ca、Mg、K 表生迁移能力由较强

到弱，这就决定了它们主要受现今环境约束，供水系沉积物的母岩影响程度处于从属地位。因而，从西北内陆区到东南沿海区随着环境的变化，碱金属、碱土金属元素总体上呈现出逐级下降的情景；铝能以氢氧化物凝胶体保留下来，故由西北到东南反而呈现出逐步富集的趋势；氟常与煤系地层紧密伴生，磷灰石则是最主要的较稳定的含磷矿物，水系沉积物中的含量更多反映原生环境特点。

(2) Cr、Fe、Mn、Ni、Co、V、Ti、Cu

这八种元素主要来自深部地壳或上地幔，或是早期原始地幔分异的残留物；从现今环境来看，属于难以迁移的元素，相近的化学特性，易于在风化过程中一起集聚和离散，因此，从西北到东南铁族元素的丰度呈现出高（内陆区）→低（高原区）→高（三江区）→低（沿海区）变化。总的说来，影响水系沉积物中这类元素区域分布特点的主导因素是地质背景，并非是环境因子。

(3) B、Hg、Li、As、Sr

在内生作用中，从超基性岩经基性、中性到酸性岩，B 和 Li 含量逐步上升，尤以岩浆期后气成-热液形成的伟晶岩中最为富集；在表生作用范围内，B、Li 矿物皆易分解析出，并被粘土矿物吸附，吸附量与粘土矿物含量成正比，水系沉积物中粘土矿物含量区域分布为北低南高，故水系沉积物中 B、Li 丰度与粘土矿物含量同呈北低南高的变化趋势。As 和 Hg 都易于在岩浆期后集中，在表生作用中又常伴生在一起，且不易迁移，水系沉积物中含量北方低于南方，基本上反映了原生状况。Sr 在伟晶岩中含量最低，在表生作用中易被 Mg 置换而流失，水系沉积物含量也出现了北高南低的变化。

(4) Mo、Pb、Zn

这三种元素往往出现在与火成岩相伴生的热液中，华南地区的岩浆活动为这类元素的富集创造了良好的机遇。就 Mo 而言，华南花岗岩中含量并不高（0.3~2.8mg/kg），但在强还原的表生作用下，在富含有机质和铁硫化物的沉积中，常发生一定程度的积累。Pb、Zn 在内生作用中常紧密共生，在表生作用中，在中性环境下遇到碳酸盐时生成稳定的碳酸盐矿物，还原时又一起生成硫化物沉淀，正是一些共同的特点，使这三种元素在水系沉积物中出现相互消长的关系。

(5) Cd

无论在岩浆岩中，还是在岩浆期后的热液中，Cd 均未出现显著的集中，常寄生在锌矿物内，成为稀有的分散元素。表生作用中的 Cd 迁移能力很弱，易于留在原地，被粘土矿物吸附。Cd 的这一秉性，决定了它与 Mo、Pb、Zn 一样，在沿海区和三江区偏高。

2 浅层地下水水质分带

我国广大基岩山区水文地球化学作用以溶滤型为主，其受地势、地貌、季风、降水量、地质背景等因素影响，致使浅层地下水水化学组分复杂多变，不过，在宏观上地带性特征仍很明显。含盐量和硬度是评价饮用水水质的主要指标，我国生活饮用水卫生标准规定总溶解性固体上限为 1000mg/L，总硬度上限为 450mg/L（以 CaCO_3 计）。

2.1 重碳酸盐型为主的淡水带

地下水含盐量绝大部分地区小于 1.0g/L，丘陵山地含盐量甚至低于 0.5g/L，滨海局

部地区为 1.0~3.0g/L 或大于 3.0g/L。在岩浆岩、变质岩区内,为 pH 值小于 6.0 的弱还原酸性软水,硬度小于 75mg/L,这种环境下有利于 Ca、Sr、Ra、Cu、Zn、Cd、 Cr^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、Co、Ni 等元素在地下水中的迁移;向西向北逐步过渡为中性氧化环境,pH 值为 7.1~8.5,硬度上升到 75~450mg/L,仅局部有岛状极软水分布。水化学类型主要为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。

2.2 重碳酸盐-硫酸盐型为主的淡水-微咸水带

带内降水充沛的补给区或强径流区以小于 1.0g/L 的淡水为主;随着气候向干旱转变,在中、下游平原与内陆盆地的部分地区,地下水含盐量增加,硫酸盐组分明显升高,含盐量达 1.0~3.0g/L,水质属微咸水,局部地区浅层地下水的含盐量甚至大于 3.0g/L。pH 值多为 7.1~8.5,硬度也相应增高,呈中-弱碱性水文地球化学环境。黄土高原还零星出现 pH 值大于 8.5 的碱性苦水;内蒙古高原等地也见有高硬度(>450mg/L)的咸水;青藏高原的羌塘湖盆地地下水水质则与盐湖有着密切联系。水地球化学类型显示为多元型,但以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 为主。

2.3 硫酸盐-氯化物型为主的微咸水带

我国西北内陆干旱区,降水稀少,浅层地下水含盐量随蒸发作用的增强而升高,除高山和山前冲洪积平原外,大部分地区是含盐量为 1.0~3.0g/L 的微咸水或大于 3.0g/L 的咸水,甚至出现大于 10.0g/L 的咸水。盐化作用强烈。水化学类型复杂,硫酸盐、氯化物组分显著增高,以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 和 $\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型为主。内陆盆地呈现出清晰的横向变化,柴达木、塔里木、准噶尔等盆地腹部含盐量颇高,尤其是柴达木盆地中央地下水含盐量最高达 600g/L 以上,已成为盐类矿床。此带浅层地下水处于弱碱性强氧化的水文地球化学环境,pH 值大部分地区为大于 8.0 的弱碱性水,硬度普遍大于 450mg/L。

3 中国土壤地球化学类型、地球化学分区和元素有效性的空间分异

风化成土过程分四个阶段:第一阶段丧失氯和硫的化合物;第二阶段丧失碱金属和碱土金属盐基;第三阶段硅铝化时期,二氧化硅开始淋失;第四阶段富铝化时期,积聚大量铝氧化物。结合介质的氧化还原性,将我国土壤划分为七个基本类型,属于第一阶段的有盐渍土、石膏型土;属于第二个阶段的有碳酸盐土;属于第三个阶段的有硅铝土;属于第四个阶段的有铁铝土。此外还有处于发育幼年阶段的碎屑土和渍水还原条件下形成的渍水离铁土。若从土壤中元素的空间分异、土壤 pH 值、有机质含量和元素有效性含量等地带性特点的宏观分析,可分为四个土壤地球化学分区。

3.1 盐渍土区

我国西部内陆干旱区,土壤质地较粗,以砂土、砂壤土为主,粘土矿物主要为水云母,土壤呈碱性。分布的主要土壤为石膏土和盐渍土,但高山亚高山地区可见有碳酸盐土和碎屑土。土壤中普遍含有盐分,主要为氯化物和硫酸盐,局部地区可出现硝酸盐和硼酸盐土。由于区内气候干旱,生物物质来源少,夏季高温有机质分解快速,土壤有机质含量通常小于 0.5%。

一般来说,盐渍土区土壤钠、钾、硼、铜等元素含量较为丰富,它们的全量和有效性均较高。全磷含量较高,但有效性不高,耕地中缺磷面积达 63%。水溶性氟含量较高,

尤其是碱化土壤。主要缺磷、锌、铁、锰和碘等元素，据统计，该区 80% 的土壤缺有效性锌和锰，50% 缺铁。

3.2 碳酸盐土区

内蒙古高原、黄土高原直至青藏高原，以碳酸盐土为主，粘土矿物主要为水云母、绿泥石，土壤呈碱性或弱碱性。在地形较高、较湿润的条件下可出现硅铝土，低洼处则发育有盐土或碱土。土壤中碳酸盐含量较高，可达 10%~20%，在土壤层的一定深度上有钙积层出现。以黄土高原为主体的碳酸盐土区，土壤有机质含量在 1% 左右。

该区土壤钾、硼仍较充足，全量和有效性含量均较高。磷的贮量丰富，但有效性不高，耕地中缺磷面积约 60%。锌、铁、锰、钼、碘和硒等元素均较缺乏，据统计，本区约有 80% 的土壤缺有效性锌、锰、铁和钼。水溶性硒含量也较低。

3.3 硅铝土区

呈带状自东北往西南伸展。以粘壤土为主，粘土矿物以 2:1 型层状硅酸盐为主，如蒙脱石、伊利石、蛭石等。土壤性质呈中性。以硅铝土为主，地形较低部位可出现碳酸盐土。

该区大部分土壤易溶盐和碳酸盐基本已淋失。由于淋溶作用加强，土壤中钾元素缺乏逐渐明显，缺钾面积可达 32%，土壤中游离碳酸钙含量的降低和活性铁、铝含量的增加，降低了土壤中磷的有效性，耕地中缺磷面积约 47%。微量元素中缺锌、锰、铁、硒和碘的面积较碳酸盐土区减少，但缺有效性硼的面积增加。由于气温偏低，有机质分解缓慢，形成了有机质含量可达 3% 以上富含腐殖质的土壤。

3.4 铁铝土区

长江以南热带亚热带铁铝土区，以粘土为主，粘土矿物主要为高岭石和铁铝的氧化物。土壤呈酸性。局部可出现硅铝土，人为作用下，可出现渍水离铁土（水稻土）。东南铁铝土区气候湿热，植物生长快，有机物虽分解快，但有机物质来源多，土壤有机质含量一般大于 1%~2%。

土壤中以富铁铝为特征，游离铁含量大于 2%，占全铁的 40% 以上。强烈化学风化、淋溶作用，钾、硼、氟等元素大量淋失，故缺钾、硼很明显，磷主要以铁、铝结合态为主，有效性较差，缺磷状况也很突出，约占耕地面积的 46%。钼、硒全量并不低，但有效性钼较低，硒的有效性较高。据统计，全区约有 60% 的土壤缺钾，90% 的土壤缺有效性硼、钼和氟。微量元素锌、铜、锰、铁等较其他地区有效性含量为高，有时作物甚至会出现锰、铝的毒害。在平原地区土壤碘含量较充足。

综上所述，从元素有效性含量来看，对于钾和硼，盐渍土 > 碳酸盐土 > 硅铝土 > 铁铝土；对于锌、锰和硒，铁铝土 > 硅铝土 > 碳酸盐土 > 盐渍土；对于钼，盐渍土、碳酸盐土 > 硅铝土 > 铁铝土。

4 我国居民膳食中元素摄入量与区域地球化学背景的关系

我国现今食物流通量除城市甚高外，广大农村以就地食源为主，居民元素摄入水平基本上受控于物源和经济发展水平两个因素，前一因素具有明显的区域性特色；后一因素按经济收入情况，以国内外供给量标准（RDA）衡量，城市、城镇和农村不同人群元素平

均摄入量相比, 经济收入高的地区, 通常微量元素的摄入量也高。

在元素摄入量上, Fe、Cu、Mn、Na、P 摄入水平比较充足, 达到了我国的 RDA 或 WHO (世界卫生组织) 的电解质安全和适宜摄入水平; Mn 的摄入量均高于美国 RDA (2.5~5.0mg); Cu 全国平均摄入量基本上与美国 RDA (2.0~3.0mg) 水准相当; Ca 的摄入量明显不足, 所有省、市、自治区均低于我国 RDA 标准, 平均含量仅为我国 RDA 的 50% 左右; Se、Zn、K 和 Mg 摄入量也偏低, Se 仅为我国 RDA 的 88.3%, 除三大城市和少数省达到 RDA 下限外, 其余各省均低于标准; Zn 为 85.6%, 除广东省的平均摄入量达到我国 RDA 标准外, 其他各省、市、自治区都明显不足; K 摄入量, 除少数省外, 大部分省份明显低于美国 RDA (1875~5625mg) 下限; Na 显著偏高, 最低省份也超过美国 RDA (1000~3300mg) 的上限, 最高的江西省平均摄入量高达 9487mg, 差不多是美国最高标准的三倍。高 Na 低 K、Ca 是我国膳食结构中的重大缺陷。

各省、市间各种元素平均摄入量差别较大, 除黑龙江省和云南省元素摄入总体水平偏低外, 一般说来, Fe、Mn、Cu、P、K 摄入量北方略高于南方, Na、Ca、Mg 西部地区低于东部地区, Zn、Se 摄入量呈现出西部新疆地区和东部广东等沿海省份高, 中部宽阔地带低的格局。

由于膳食摄入量按行政区划统计, 与区域地质、地球化学背景和自然地理环境之间的联系远不如浅层地下水、土壤和人来得紧密。不过, 我们从不同人群膳食摄入量的区域分异中还是可以看出, 食源中的元素含量与生物环境地球化学背景之间的关系。所有这些, 恐怕绝非是偶然的巧合, 意味着在某些相同因素作用下, 它们之间确实隐含着有机的联系。

K、P、Mg: 由于我国土壤中有效钾普遍不足, 以致食源中钾也偏低。从地区的差异来看, 无论是水系沉积物还是土壤中速效钾含量从西北到东南呈下降的趋势, 食源中钾含量也呈相应的变化, 如青海省每天人均摄入量 (2493mg) 几乎是海南省 (1332mg) 的两倍。水系沉积物中与膳食摄入量中的 Mg, 土壤有效 P 与膳食摄入量中 P 的各自含量, 总体上同由西北向东南降低的相似变化趋势。

Se、Zn: 在东北三江 (黑龙江、松花江和乌苏里江) 到西南三江 (怒江、澜沧江和金沙江) 北东-南西向的低硒带内, 无论是土壤中的有效含量, 还是膳食摄入量, 再或是人发中含量皆处于低硒的背景, 向其两侧西北内陆地区和东南沿海地区推移, 各介质中的硒含量显著升高。现仅从膳食中的 Se 含量来看, 西北新疆维吾尔自治区城乡居民每人每天平均摄入 57.4 μ g, 东北三江-西南三江区内各省区摄入量为 32.7~38.0 μ g/(人·天), 东南沿海区除广西、江西外, 摄入量为 43.9~53.0 μ g/(人·天), 与生态系统中 Se 的丰缺基本吻合。我国甘肃等地区, 自然地理环境迫使土壤中锌生成溶度积较低的碳酸锌, 有效性降低, 不利于植物吸收, 以至食源中 Zn 含量也低。在广东珠江三角洲一带的局部地区, 水系沉积物中的含量并不高, 但易生成水溶性锌, 土壤有效含量很高, 膳食摄入量也处在全国最高值范围内。

Fe、Ca: 各介质中 Fe 含量的变化依然按北西-东南向依次演变。总的说来, 我国膳食中的 Fe 含量不低, 但缺 Fe 性贫血仍较普遍, 可能与饮食结构和 Fe 的吸收利用有关。就我国居民总体膳食结构而言, 主要为植物类, 惟新疆等地的牧区例外, 牧民以肉、乳类食品为主, 占 50%, 而豆类、蔬菜消耗极少, 几乎是零。水系沉积物与土壤有效含量总

体上为西北地区低、东南地区高，膳食摄入量调查和计算结果却与此相反，西北地区高、东南地区低；人体易于吸收动物中的铁，可能是一个重要的影响因素。然而，令人费解的是发铁含量西部新疆维吾尔自治区却比东部广东省低，究竟是何原因，尚待进一步探讨。水系沉积物和膳食摄入量分布格局同样不协调。我国食源中 Ca 普遍匮乏固然是不能满足人体需要的原因之一，更重要的原因恐怕与食物结构和人体本身的吸收能力有关。

Na：作为食物调味品，受强烈的人为因素干扰，不反映与原生物源的关系。

从调整人们的饮食结构入手，保持人体内所需营养物质的平衡，增进人体健康，真正达到预防为主，医疗为辅的目的，是一个复杂的过程。区域地球化学对健康与疾病影响的研究是其中的一个重要环节，也是一项从人类生存和持续发展这一长远目标着眼所应进行的研究工作。

5 人发中微量元素的分布特征与区域地球化学背景的关系

以人群为中心，以人体内生命元素的区域分布为主线，探讨环境地球化学病，已取得了许多重要认识。人发中生命元素的含量水平，并结合整个环境进行综合分析，不仅综合反映了区域地球化学特征，同时也能较好地反映不同人群人体中生命元素的代谢状况及健康水平。

如前所述，水系沉积物中元素含量和土壤中元素有效含量的总体集聚趋势，基本上都呈北东—南西向展布，正是由于水系沉积物和土壤中物质组分均受母源物质和自然环境双重因素的制约，才形成如此的水平分带的格局。饶有趣味的是区域人群人发中元素高、中、低含量的总体延伸方向，基本上也都呈北东—南西向展布，三者基本一致。而且不同人群人发中有些元素集聚和离散的特点似乎继承了水系沉积物、土壤有效含量的区域分布格局。其中人发硒与地球化学背景的关系最为密切，发硒低含量级地域主要分布在从我国东北到西南的广阔地带内，形成一条与克山病和大骨节病以及动物硒缺乏症流行区相吻合的低硒地方病带，其两侧则为硒高含量级地域，并以西北荒漠草原地区和海南岛热带雨林地区发硒含量最高，浙、闽、粤、桂沿海和滇西南、藏南地区发硒含量略低，长江中下游流域更低，但仍高于低含量级。其他如，发铝含量总体上呈现出南高北低的分布格局，铝硅酸盐矿物的解体与铝的析出水平基本上也遵循这一规律；又如，水系沉积物中汞和砷的高值区都出现在我国长江以南地区，且与高砷、汞的地质背景相吻合。从人发中获知，高汞、砷人群居住区与水系沉积物高值区近于一致，尤其在云贵高原内的某些汞矿区周围，都出现异常值；再如，发铁含量以秦岭—淮河一线为南北分界线，呈现出南高北低的变化趋势，例外的是，松辽平原和东北、华北西侧的草原土和黑垆土（均腐土和新成土）景观地区的发铁含量也属高值带范畴，总的来看，与土壤中有效铁含量南高北低趋于一致。

影响元素在不同介质中传递的因素众多，不仅涉及到元素从岩石到土壤迁移转化的过程，作物中元素含量的区域性差异，还牵扯到饮食结构和人体对不同元素化合物的吸收能力，以及不同元素之间的拮抗与协同作用等因素，对许多悬而未决的问题还需进行更系统更翔实的研究。

6 区域地球化学特征在农业上的意义

植物生长完全取决于它的遗传特性及其赖以生存的土壤和环境条件。根据我国独特的土壤地球化学区域性特点、土壤地球化学类型和地球化学元素分布格局,尤其是土壤中元素的有效性及其转换条件,并结合不同种类作物生长的实际需要,应充分利用土壤养分资源,优化农业结构,因地制宜,因土种植,合理施肥,提高作物产量,改善作物品质,以减缓或杜绝环境污染,获取更高的经济效益,使我国农业再上一个新台阶,促进我国农业的持续发展。

6.1 因土施肥

不同土壤地球化学区内,元素有效性存在差异。铁铝土区严重缺磷,即使在磷贮量较丰富的盐渍土区,因其有效性低,施用磷肥可起到显著的增产效果。缺钾土壤面积由铁铝土区向硅铝土、碳酸盐土区扩增,在盐渍土区,是富中有缺。为提高肥料的利用率,按适当比例投放氮、磷、钾肥尤为重要。在一些既缺氮又缺磷的土壤上,单施氮肥增产效果不大,如在一定磷肥基础上加施氮肥,作物产量可成倍增加。在铁铝土区,氮、磷肥充足的基础上施入适量钾肥,产量也可大幅度提高。

不同微量元素在不同类型土壤中的含量差异很大,不同作物对微量元素的需求也各不相同,有针对性地施用微肥可获良好的效果。例如,在铁铝土上,种植油菜,施用硼肥,种植豆科植物,施用钼肥,均能取得良好效果;在硅铝土和碳酸盐土上,小麦、大豆田里施用锰肥,玉米、水稻田里施用锌肥,效果也很明显。盐渍土里施锌、铁和锰肥,对作物均有不同程度的增产效益。微肥用量虽少,但应考虑各元素间的拮抗和协同作用。例如,漠境土壤中,氮、磷、锌对作物都供不应求,三者按比例配合施用,通常氮肥能增强对锌的吸收,但大量施用磷肥,会降低锌的有效性,锌过量又会诱发缺铁,铁过量也能诱发缺锌,还减少磷的吸收,只有当三者平衡时才能使作物获得高产。不同土壤类型中钾、硼含量也不一样,低硼时,随钾用量增加,作物缺硼症状加重;在高硼状况下,随着钾量的增加,作物硼中毒症状显著减轻。

土壤 pH 值往往影响土壤养分有效性。土壤中酸性物质的积累,可使 pH 值突然降到 4.0 以下,导致土壤中硅酸盐矿物解体,铝、铁、锰等元素大量释放,造成植物中毒。因此,我国南方酸性土壤常以喷施石灰调节土壤 pH 值。在酸性铁铝土区,尤其是以灰岩为母质的石灰性土壤,缺锌、铜比较明显。又如漠境地区土壤,碳酸钙含量较高, pH 值大于 7.5,对施入土壤中的硼、铁、锌、锰等产生固定作用,有效性降低。总之,为增强或降低土壤中作物养分元素的活度,通过调节 pH 值,充分利用土壤养分资源是有效地促进农业生产的途径之一。土壤的 E_h 状况也影响元素的有效性,如磷在淹水还原条件下,有利于提高磷的有效性,在冬种旱作上重施磷肥,其后插种水稻仍可继续利用。故铁铝土区乃至硅铝土区推广旱轻水的施磷技术是一项有效的增产措施。

6.2 合理施肥,防止环境污染

天然水体中的 $w(N)/w(P)$ 比值一般大于 20,藻类生长 $w(N)/w(P)$ 比值的范围为 4~10,最佳比值为 7。除了控制工业和城市排放含磷污水外,只要合理施用磷肥,尤其是控制水体或水体附近土地上的磷肥施用量,并注意防止水土流失,就不会造成

水体的富营养化。

在施氮肥时，要防止因施用不当，而造成地下水中硝态氮含量超标，或菜地施用过量氮肥，使蔬菜中硝态氮含量增加，危及人体健康。为避免污染的蔓延和加重，应根据土壤综合分析成果、施肥模型和农民的实践经验，明确肥料类型和用量。这种科学施肥，不仅可提高经济效益，达到理想的产量，还可降低硝态氮残留量，减少土壤中 NO_3^- 的淋失，不致严重污染地下水源。

在施磷肥时应防止将一些有害元素带到土壤中，如 Cd、Pb 等，尽量避免对环境造成新的污染。

6.3 因土种植，发展名特优农产品

据研究，名茶适宜种植在酸性、高钾、高硅以及有效性锌、铜、硼等微量元素较高的土壤中；优质烟草则宜种植在中性，碳酸钙含量低，钾素供应充足，有效性硼、锰、铜、锌较高的土壤上；大部分中草药（约 4800 多种）集中产于铁铝土区，如龙脑香、罗汉果、山奈、浙八味、川贝母、杜仲、三七等。如能根据名特优农产品的土壤地球化学条件调整种植布局，创造名特优产品适于生长的条件，必将带来巨大的经济效益。

6.4 开源节流，开辟土壤养分资源

根据土壤中元素循环的特点，合理开发利用土壤中养分资源，可有效缓解一些紧缺肥料的供需矛盾。在这方面，钾素资源的合理利用尤为重要，如利用农田自身钾素的再循环。水稻稻秆、麦秆、玉米秆中钾素含量较高，有效性也高，是我国农业土壤中钾的重要来源。将作物秸秆还田，可使土壤中 50% 的钾回田，这是一项既经济又有实效的措施。除了开发盐湖钾肥资源外，在缺钾地区利用某些富钾母质或母岩（如南方的泥页岩、花岗岩等），通过一定技术处理，提高其有效性，然后就地施用；在富钾的土壤上种植聚钾植物（如向日葵、甘蔗等），然后加工成肥料或提取钾素，在缺钾地区施用。

6.5 典型研究——柑橘种植实例

6.5.1 土壤中微量元素含量与柑橘生长

柑橘叶片中，Zn、Mn、N 含量低于柑橘叶缺乏的临界值，B、Cu、Mn、Fe 处于适量范围，K、P 略偏低，B、Cu 平均含量适中；仅在石灰性紫色土和滨海盐土区种植的柑橘树方出现典型的缺铁症状，叶片含铁量多在 50mg/kg 左右。柑橘叶片中元素含量与土壤有效含量的总体特点是，叶片中 Zn、Mo、K、P 贫乏，Mn、Fe 相对丰富，与土壤相应元素有效含量贫富一致，说明我国南方土壤中锌、铜、硼供应不足，Mn 和 Fe 基本上不缺。

6.5.2 柑橘树和土壤间元素交换

柑橘树对元素的需求不同，选择性吸收能力也存有差异。从温州蜜柑树中的元素含量来看，对土壤中大多数的营养元素有着明显的富集作用。被吸收的元素大体上可分为三组。第一组明显富集，如 Ca、P、K，吸收系数为 $n \times 10 \sim n \times 100$ ；第二组适量富集，如 B、Zn、Cu 等，吸收系数为 n ；第三组不显富集，如 Mn、Mo 等，吸收系数小于 1。归纳起来，温州蜜柑树对土壤元素的富集顺序为： $\text{Ca} > \text{P} > \text{K} > \text{B} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Fe}$ 。

柑橘树每年通过凋落物（主要是叶片）归还给土壤的数量随柑橘品种、树龄等因素而异。红壤区温州蜜柑树每年通过凋落物归还土壤最多的元素是 Ca、N，其次是 P、K、Mg；微量元素以 Zn、B 较多，Cu、Mn、Mo 较少，Fe 的归还最少。其归还顺序为： $\text{Ca} > \text{N} > \text{P} > \text{K} > \text{Mg} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Fe}$ 。

果树生长吸取养分, 土壤排水、侵蚀、淋溶、渗滤损耗养分, 大气降水补给养分。在柑橘园开放的生态系统中, 养分的输出与输入是不平衡的。若仅就采果、修枝等输出养分, 落叶归还输入养分, 其他因素暂不考虑, 橘园土壤养分的支出远远超过输入。N、K、Ca、P、Mg 和 B、Zn 消耗尤多。每年每公顷地通过采果、修枝等输出的养分: N 为 67.7kg, K 为 61.3kg, P 为 5.07kg, Ca 为 25.08kg, B 为 80.42g, Mn 为 89.02kg, Zn 为 55.77g 等。显然, 我国南方主要植橘土壤 N、P、K、Ca、Mg 供不应求, B、Mo、Zn 也偏少。因此, 要获得高产、优质, 必须通过合理施肥加以调控。

6.5.3 微肥效应

根据柑橘对养分的需求, 结合土壤养分元素有效含量, 合理喷施锌肥可促进蜜橘果树的生长。对 100 条枝梢的观察结果是: 枝梢增长, 枝茎变粗, 并能防治和矫正柑橘因缺锌引起生理失调而造成的“花叶”现象。对缺锌叶肉细胞的超显微特征的研究表明: 缺锌叶肉, 细胞质内质网及核糖体稀少, 叶绿体受到严重破坏, 并充满大的淀粉粒; 喷施锌肥后可使细胞结构恢复正常, 细胞质浓厚, 叶绿体数量增加, 并出现大量多种形态的粗面内质网, 促进光合作用。这从细胞学上为柑橘增产和改善品质提供了理论依据。

在广西桂林地区不同土壤类型的柑橘园里连续进行了三年喷施 Zn、Mo、B 肥试验, 与未喷施的对比, 取得增产 20% 以上的显著效果。在石塘、九点、白沙、大倚等果园的试验结果, 经 “t” 检验达到显著水平。温州蜜橘喷施硼肥后, 果汁含量增加, 固形物亦呈增长趋势。喷施钼肥后, 温州蜜橘果皮色泽鲜艳, 提前成熟 7~10 天, 全糖含量平均增加 4.4%~11.4%, 维生素 C 含量比对照果实也提高 4.7%~8.4%。喷施锌肥改善了果品品质, 如温州蜜橘柑皮光滑, 果实硕大而均匀, 与对照果实相比, 全糖含量增加 2.9%~17.3%; 又如, 新桧橙果皮变薄, 可食的果肉比对照果实增加 10.7%, 柠檬酸和全糖含量分别比对照果实提高 8.9%~17.3%。

7 区域地球化学在生命科学上的意义

7.1 克山病和大骨节病

我国克山病和大骨节病地域分布近于一致, 自东北三江(黑龙江、松花江和乌苏里江)至西南三江(怒江、澜沧江和金沙江)地区呈北东-南西向展布, 是一条以棕褐土系为中轴的地带, 发生在食用当地生产的粮食和蔬菜的农村人口中, 克山病以 10 岁以下的儿童和育龄期妇女为主要发病人群。病带的共同特点是: 总体上硒处在低水平, 形成一个地理上的低硒循环生态系, 即从土壤有效量到粮食再到食物摄入量最后到人体内硒的通量通常较低。病区土壤硒含量大多小于 0.25mg/kg, 尚不算低, 但从前述的病带所处的土壤地理环境分析和水硒形态调查中获知, Se 主要以溶解度低的亚硒酸盐形式出现, 有效量甚低, 粮食硒含量小于 0.025mg/kg, 食物摄入硒 32.7~38.0 μ g/(人·天), 人发硒量小于 0.20 μ g/g, 血液中硒含量低于 0.030 μ g/g。

硒不是孤立发生作用的, 其生物学功能受多种因素影响。将人发、玉米、大米、小麦的多元素含量水平按克山病区、大骨节病区、非病区三种特异点进行的一系列统计分析表明, 地区不同, 组合判别式也不同。但硒的主导作用不变, 其次为 Cu、Ba、Zn 等元素。从区域地球化学总体特点来看, 病带土壤偏中性, Se、Zn、Fe、P、Mn 有效含量偏低,

Zn、Mn 分别低于匮乏临界值 0.50mg/kg 和 7.0mg/kg, Fe 处于中等偏低的水平, 介于 4.5~10.0mg/kg 之间, 由于病带内碳酸盐发育, Cu 易于沉淀。农村居民营养素摄入量调查表明, 除 Se 低外, 病带内 Cu、Zn、P、Mn 都低于全国平均水平, 惟 Fe 在全国平均水平上下摆动。这与上述数理统计分析结果趋于一致, 更进一步表明了生物地球化学环境与克山病和大骨节病之间的对应关系。

自 20 世纪 70 年代发现环境低硒与两病有密切关系, 用补硒制剂防治实验获公认效果后, 已普遍推广, 提高了病区人体硒水平, 克山病发病率明显下降, 新发病人减少, 大骨节病也得到了良好的控制。

7.2 主要恶性肿瘤

20 世纪 90 年代初三年死亡回顾调查表明, 我国居民恶性肿瘤死亡率呈明显增长趋势, 占各类死亡原因的比例由 70 年代的 12.22% 上升到 18.07%, 成为我国居民第二位的致死原因。甚至一些大、中城市已上升至首位。城市居民中肺癌、乳腺癌、肠癌和白血病不论是粗死亡率, 还是年龄调整死亡率均呈上升趋势, 尤以肺癌增长最快, 已跃居各癌症之冠; 肝癌呈一定程度的波动; 胃癌、食管癌、鼻咽癌、宫颈癌呈下降趋势。农村地区, 除宫颈癌下降外, 其他癌症皆呈上升趋势, 尤其是胃癌和肝癌。

各种恶性肿瘤有各自分布特点, 肺癌、乳腺癌、肠癌和白血病相对高发区位于东部沿海、长江中下游和东北工业发达地区, 胃癌主要集中在西北和沿海各省, 甘肃、青海、宁夏、江苏、上海、福建及胶东和辽东半岛尤为显著; 食管癌在中西部和沿海山区形成高发区, 以太行山南段、大别山、闽南、粤东北、川北、祁连山和新疆达拉布特山等地最为集中; 肝癌主要分布在东南沿海各省和东北吉林省, 自沿海向内地逐渐降低; 鼻咽癌高发区局限在东南沿海, 广东尤为突出; 肠癌高死亡率出现在东南沿海区。

各部位恶性肿瘤具有一定的聚集性, 以县为单位的主要恶性肿瘤死亡率主成分因子多变量相关系数矩阵分析指出, 除肺癌与宫颈癌、胃癌与乳腺癌、结肠癌与宫颈癌、白血病与宫颈癌少数恶性肿瘤无明显相关关系外, 大多数恶性肿瘤死亡率之间有明显的关联性。在恶性肿瘤死亡率两相关系数中, 鼻咽癌与肺癌、食管癌、胃癌、结肠癌、宫颈癌、肝癌与宫颈癌在地区分布上呈明显的负相关, 其他有意义的关联性中, 两两相关系数均呈明显的正相关, 尤以消化系统各种癌症之间正相关格外鲜明。

运用正交旋转和斜交旋转等不同方法对主成分分析的结果进行进一步分析, 可判断部位别恶性肿瘤与四个因子的对应关系: 因子 1 与肺癌、白血病、乳腺癌、结肠癌呈明显的正相关, 大量的研究表明这些恶性肿瘤与环境污染、职业危害以及吸烟、饮酒、高脂肪、低纤维食物、肥胖等不良生活方式和行为有关, 有些学者称这类恶性肿瘤为“富贵癌”, 因此我们称因子 1 为“富癌因子”。因子 2 与胃癌、食管癌呈明显的正相关, 这类恶性肿瘤与地理、地貌、植被, 食物中亚硝酸含量、低动物、低维生素饮食, 以及霉变、烟熏食物摄入量等有关, 有些学者称这类肿瘤为“贫穷癌”, 因而定义为“贫癌因子”。因子 3 与鼻咽癌、直肠癌和肝癌关系明显, 高发地区或低发地区是否存在这些肿瘤共同的致癌或抑癌因素还不清楚, 把因子 3 称为“特发癌因子”。因子 4 仅与宫颈癌有明确关系, 已有的研究表明, 宫颈癌与性生活卫生、宗教信仰、生育过度和传统生活方式等有关, 在相关分析中宫颈癌与其他大多数部位别恶性肿瘤无明显的关系, 因而我们定义因子 4 为“宫颈癌因子”。

将主要部位别恶性肿瘤调整死亡率与当地居民人发中某些微量元素的含量进行相关回归分析。部位别恶性肿瘤分别作为因变量,引入 19 种微量元素含量进行逐步回归。当确定入选变量的显著性水平为 0.15,剔除变量的显著性水平为 0.05 时,得到主要部位别恶性肿瘤调整死亡率与人发中微量元素含量的逐步回归模型。

部位别恶性肿瘤死亡率水平与微量元素含量的逐步回归模型显示,聚集在一起的部位别恶性肿瘤大多有共同关联的微量元素,如与肺癌、白血病等相关联的微量元素有铅、砷、钾等;与胃癌、食管癌等相对应的有铁、钾等;与结肠癌相关联的微量元素有镁、铜;与直肠癌相对应的有钴、铬、钼;与鼻咽癌关联性较为显著的有砷、钡、钴、铬、钼;与肝癌相关联的微量元素有铜和钙;与宫颈癌相关联的有硒、铁、铅;与乳腺癌相关的仅筛选出元素镉。这些元素含量的高低虽然还不能完全解释上述恶性肿瘤死亡率水平及其集聚性,但与部位别恶性肿瘤死亡率及其集聚性有一定的联系。我们的分析结果与文献报道的基本吻合。

癌症是一种多因素或多病因疾病。对机体内元素功能的认识尚存在许多扑朔迷离的问题,不仅是元素间的拮抗和协同作用,还由于人体组织内微量元素稳定浓度很低,存在形式也不一样,细微的变化都会影响元素的吸收和体内代谢的功能。

7.3 典型实例——氟中毒症研究

华北平原高氟地下水是在特定的自然地理、地球化学背景上,通过淋溶、解吸、蒸发浓缩、盐分积累等作用,在水-岩系统内经历了化学热力学、化学动力学反应过程形成的。在此过程中,水文地球化学作用是关键,它可影响水-岩系统内氟形态的转换, F^- 及其复杂配合物在地下水中的集聚能力等。

通过地球化学模拟,获知深层和浅层高氟地下水的地球化学行为是不同的。也就是说,浅层高氟地下水与深层高氟地下水的形成机制及其控制因素有所不同。浅层高氟地下水常与盐碱地形影相随,主要以吸附性氟为物源,在地形、蒸发力、松散沉积物、地下水埋深等要素支配下,在水中集聚而成,氟浓度随矿化度增长而增长,并在季间及年间有较明显的浓度波动。深层高氟地下水是在滞缓水运动条件下,盐分积累、水化学组成、含水介质氟矿物含量和氟物质的侧向补给量等共同作用下形成的。

氟在地下水中可能的存在形式有 22 种,在研究区 pH 值为 7~8 的浅层地下水中,氟的存在形式只有 10 种,即 F^- 、 $BF(OH)_3^-$ 、 HF_{AQ} 、 CaF^+ 、 MgF^+ 、 MnF^+ 、 AlF_2^{2+} 、 AlF_2^+ 、 AlF_3^0 和 AlF_4^- 。其中以 F^- 、 MgF^+ 和 CaF^+ 三种形式为主。在地下水中,氟不仅是多态的,而且随着水介质性质及化学组成的变化,其赋存形态的配比关系也相应地调整,即 pH 值增高, F^- 浓度增大。地下水中的氟的赋存形式,从淋溶、迁移带→迁移、集聚带→富集带,随着 F 总量的增加, αF^- 和 αCaF^+ 的百分比逐渐降低,而其他存在形式的百分比逐渐增大,表明从淋溶、迁移带→富集带,氟的配合作用增强,组分形式逐渐增多,浓度亦相应增大,同时氟的迁移形式也由单一的 F^- 为主转变为以 F^- 、 MgF^+ 和 CaF^+ 等多种迁移形式,其迁移、富集能力增强。

医学研究证明,胃肠道吸收 F^- 远较氟配合物的能力强。如前所述,氟与铝、铁、钙、镁等离子形成配合物,实验证明,其中与氢氧化铝的拮抗作用最为重要,它可以使人体对氟的吸收率从 96% 下降到 42%,而铁虽有促进胃肠对氟吸收的功能,但其与钙、镁的作用远不如铝的作用大。我国北方地区因蒸腾浓缩水的矿化度高,地下水中氟、钙、镁浓度

相对较高，尤其是氟离子浓度高，铁、铝离子浓度相对较低；而我国南方地区则出现相反情况，且氟主要为配合形式。尽管北方地区土壤和水系沉积物中氟的平均背景值低于南方，但地下水的矿化度、氟浓度、氟的形态以及拮抗作用，共同决定了人体对氟的吸收能力，从而决定了氟对人的危害程度，这就是为什么北方往往形成大范围的水氟中毒的缘由。

参 考 文 献

- 李家熙，吴功建，黄怀曾等．中国生态环境地球化学图集．北京：地质出版社，1999
- 李家熙，吴功建，黄怀曾等．区域地球化学特征与农业和健康．北京：人民卫生出版社，2000
- 龚子同．中国土壤地球化学环境．贵阳：贵州人民出版社，1990.60~61
- 王云钊主编．氟骨症 X 光诊断学图析．北京：中国环境科学出版社，1990.8~10
- 谭见安主编．中华人民共和国地方病与环境图集．北京：科学出版社，1989.61~71
- 李家熙，吴功建，黄怀曾等．硒、氟地球化学与人体健康．岩矿测试，1996，15：241~250