

# 伯特兰德定律和温伯格原理及推广

曹玉清<sup>1</sup>, 胡宽塔<sup>1</sup>, 于 莉<sup>1</sup>, 李树林<sup>2</sup>

(1. 吉林大学, 环境与资源学院, 吉林长春 130026; 2. 山西煤田水文地质 229 队, 山西太原 030006)

**摘要:** 将温伯格原理和伯特兰德定律推广到水文地质单元内不同水文地球化学区; 在元素被溶(淋)滤、强烈迁移的水文地球化学区段造成某些元素缺乏, 生物生理负效应与元素质量浓度成负相关关系; 在元素聚(富)集、溶滤、蒸发浓缩水文地球化学环境区, 以及某些元素污染环境造成过量, 生物生理负效应与元素质量浓度成正相关关系; 在此两者之间为元素质量浓度适宜区。根据山西离柳水文地质单元内研究获得: 在元素淋滤、流失水文地球化学区水(土)中缺 Se, I, F 引起的 KBD, IDD, 龋齿病证实, 其患病率与相应元素质量浓度成负相关关系; 在聚(富)集、溶滤区因水(土)中 F 过量而患的地氟病, 患病率与 F 质量浓度成正相关关系。

**关键词:** 最适营养定律; 水文地球化学区; 生物生理负效应; 双阈元素。

中图分类号: P592 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)05-0481-05

**作者简介:** 曹玉清(1939—), 女, 教授, 1961年毕业于长春地质学院水工系, 主要从事水资源与生态环境的教学与研究工作。

## 0 引言

一个较好的生态环境系统,除了需要充足的水源、气候、土壤肥力和良好的土壤结构等,水土中的宏、微量元素的配比和质量浓度也应适当,不足或过量都会引起生物生理失衡。在地表和地下水迭置在一起的大水文地质蓄水构造(下文简称水文地质单元)内,由地质构造因素制约的地形地貌,不仅决定着地表和地下水流及不同富(透)水性含水层的展布,也制约着水文地球化学反应、水化学类型、矿化度差异而呈分带性,以及元素迁移、分异和聚集的特点。造成水文地质单元内元素丰度分布的差异,构成植物和农作物生长质量好坏、产量多少、动物生长健壮程度和人类健康状况各异的生态环境条件区。本文讨论的重点是将室内试验获得的伯特兰德(G. Bertrand)定律和温伯格(E. D. Weinberg)原理<sup>[1]</sup>,推广到水文地质单元内不同水文地球化学环境区,阐述与水(土)中某些元素丰缺有关的人群生存和健康环境方面的基本规律。

## 1 伯特兰德定律和温伯格原理

伯特兰德用生物必需的微量元素 Mn 研究植物适应性,认为植物缺少某种必需元素便不能成活;当元素适量时,植物便能茁壮成长;过量时植物便显示中毒甚至死亡。施罗德(H. A. Schroeder)将此称之为生物最适营养浓度定律。温伯格原理是:一定量 Mn 可能对某种细菌的生长是适宜的,但对促进它们产生抗菌素则未必适宜,这一原理对维护生物营养和健康皆有很重要的意义。

伯氏定律和温氏原理图解见图 1。其含义为:当无某种元素时,生物不生长或无生理功能,图 1a 中曲线 *ab* 表示元素缺乏状态,元素浓度增加则生理效

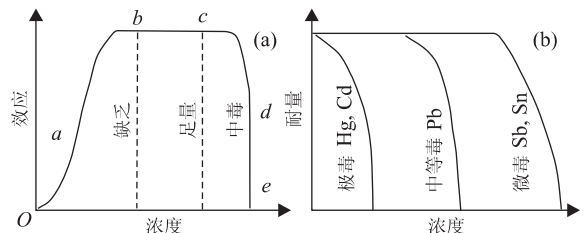


图 1 伯特兰德定律和温伯格原理示意<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Schematic figure of G. Bertrand law and E. D. Weinberg principle

应改善;曲线  $bc$  表示某元素适量则生物生理功能最佳,  $bc$  段的宽度随元素和生物不同而异, 但哺乳动物中  $bc$  是相对宽的, 因为这类动物能摒弃它所不需要的过量元素; 当元素浓度超过动物所能拒绝或排泄过量元素的能力时便使之中毒(曲线  $cd$  段), 元素质量浓度进一步增加, 曲线垂直( $de$ )下降, 表示中毒极深并导致迅速死亡, 曲线  $abcde$  适于一切生物, 在植物中浓度范围可能十分小。

温伯格原理是从元素毒性差异出发, 生物对不同有毒元素有不同的耐受量, 元素毒性在某种浓度下生物可以耐受, 但稍过量毒性就会剧增, 最后导致死亡; 同时毒性大的元素生物耐量小, 毒性小的元素生物耐量大. 该作者列出生物对不同有毒元素耐量与浓度的关系表示在图 1b 中. 表明生物对不同有毒元素有不同的阈限, 逾此阈限便出现中毒或致死. 一切生物均有此现象。

## 2 伯氏最适营养定律在水文地质单元内不同水文地球化学区的推广

笔者认为, 自然界是个“大实验室”, 自然界生物出现的某种环境现象, 是在自然界“大实验室”内的不同实验条件下, 经过长期“实验”获得的. 由于伯氏定律反映生物生理效应与元素质量浓度有关, 根据水文地球化学中结合地质地貌条件的论述<sup>[2]</sup>, 对于生物必需的双阈元素浓度与其生理效应, 将伯氏定律推广到水文地质单元内不同水文地球化学区, 综合表示在图 2 中, 它表示了生物生理效应与水文地质单元内一定水文地球化学环境下元素浓度的变化关系, 按此变化关系可分成 3 个区进行讨论。

### 2.1 元素质量浓度不足阈区

横轴上元素质量浓度  $Oc$  段, 对应着生物生理效应曲线  $OCDEG$ , 反映元素质量浓度不足阈区生物生理效应的轻重程度, 如元素含量为  $Oa$ , 对应生理负效应为  $OCBA$  (左横线柱), 元素生理作用为  $OCa$  (竖线部分), 负效应为重的; 元素质量浓度为  $bc$  ( $=Oc - Ob$ ), 对应的负效应为  $EFG$ , 而元素生理作用为  $bEGc$ , 负效应为轻的, 两者之间负效应为中等. 由此可知, 在元素不足阈区内, 生物生理负效应与元素质量浓度呈负相关的关系. 在水文地质单元内, 元素不足阈对应的区段是组成矿物的元素被溶解、淋滤、迁移和强烈流失的水文地球化学区段, 相应的是

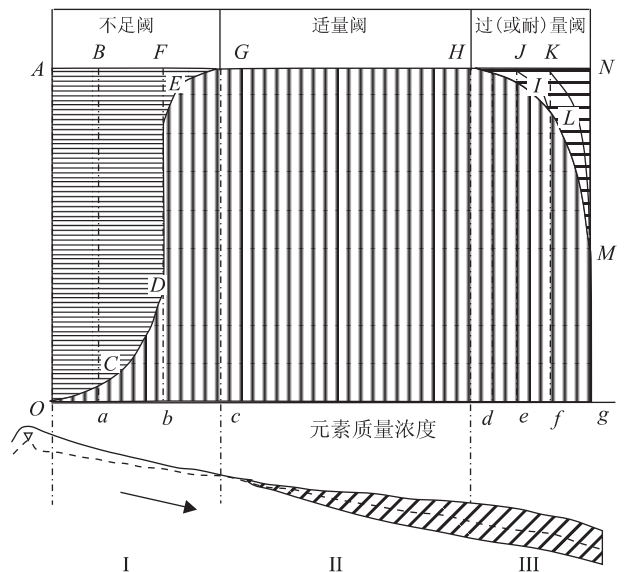


图 2 水文地质单元内元素分异的伯特兰德最适浓度和温伯格原理示意

Fig. 2 Sketch map of G. Bertrand optimum concentration law and E. D. Weinberg principle of element differentiation in hydrological unit

地表水、地下水流失快的山区或高地组成的补给区和补给径流区<sup>[2,3]</sup>。

### 2.2 元素质量浓度适量阈区

曲线  $GH$  对应元素质量浓度为  $cd$ ,  $cd$  间隔含量为生物生理效应最佳段 ( $cdHG$ ), 其中  $Oc$  为生物生理效应最佳区的下限质量浓度,  $Od$  为上限质量浓度. 在水文地质单元内为元素迁移—溶滤—适量聚集的水文地球化学区, 其对应位置为水质好、水量丰富的高平原、冲洪积扇(裙)含水丰富、水质好的中—后部和轴部; 基岩含水层浅埋的径流区, 也是适于生物生长和人类生产、生活及经济活动的良好地区, 同时又是人类活动造成大气、水、土污染和固体废物污染的地区<sup>[2,3]</sup>。

### 2.3 元素质量浓度过量阈区

元素质量浓度  $dg$  对应曲线  $HILMg$ , 是由元素质量浓度过高引起的生理负效应区 (右横线部分), 其中曲线  $HI$  对应元素质量浓度  $de$  超过生物生理所能承受的能力而产生负效应为轻中毒, 用  $HIJ$  表示; 曲线  $ILMg$  对应元素质量浓度为  $eg$ , 则对应生物生理效应为中等中毒 ( $JILK$ )、重中毒 ( $KLMN$ ) 直至死亡 ( $Mg$ ), 因此在元素质量浓度过量区, 生物生理负效应与元素质量浓度成正相关关系. 在水文地质单元内属于元素聚(富)集—溶解—蒸发浓缩作

用<sup>[2~4]</sup>的低平原、湖盆、河流尾间或下游某些地段,以及含水层深埋区等.

### 2.4 温伯格原理的推广

虽然温伯格原理是从元素毒性大小出发来讨论生物生理效应,但是不同毒性元素产生的生态环境负效应仍与元素质量浓度的大小成正比关系.如毒性大的元素质量浓度以  $H$  为其耐量起点,随元素质量浓度由  $H$  增大至  $J$  (对应横轴  $de$ ),生物中毒逐渐加重直至死亡(以  $Hle$  表示);毒性小的元素,生物耐量为  $HK(=Of-Od)$ ,也是随着质量浓度的增加(由  $K \rightarrow N$ ),则中毒由轻至重直到死亡(以  $KNMg$  表示);两者之间为毒性中等的元素,生物生态环境效应变化与上类似(以  $JLf$  表示).由于生物对有毒元素引起的中毒与双阈元素过量引起的中毒具有类似的规律,所以将温氏原理曲线合并放在图2中过量阈区内;但在水文地质单元内,任何区内存在有毒元素污染,均可用温氏原理反映的规律衡量,即不受水文地球化学环境区的限制.

综上得:水文地质单元内不同水文地球化学区,与元素质量浓度有关的生物生态环境负效应的基本规律是:(1)对双阈的生物必需元素,在水文地质单元内有如下3种情况,Ⅰ.在元素缺乏的水文地球化学环境区内,元素质量浓度与生态环境负效应成负相关关系;Ⅱ.在元素过量的水文地球化学环境区,元素质量浓度与生态环境负效应成正相关关系;Ⅲ.在元素质量浓度适当的水文地球化学区,则无生物负效应.这就是推广到水文地质单元或自然界的伯特兰德最适营养定律.(2)对有毒的单阈元素,在水文地质单元或自然界内,由污染和天然原因造成有毒元素过量的基本规律是:元素质量浓度与生物生理效应或生态环境负效应也为正相关关系,但不同生物的耐毒性和元素的毒性是不同的,通常存在如下两种情况:Ⅰ.污染造成的负效应较快地表现出来;Ⅱ.定时炸弹效应<sup>[5]</sup>.它是土壤和沉积物中贮存的化学物质因环境缓慢改变而活化,引发的滞后而突发的有害效应.这便是推广到水文地质单元内或自然界的温伯格原理.

### 3 离(石)—柳(林)水文地质单元内某些元素质量浓度与人群健康的关系

山西省离柳地区东部是吕梁山脉,其主峰位于

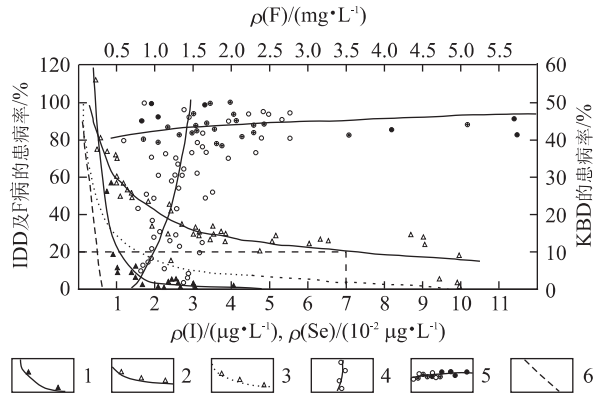


图3 离柳地区 KBD、IDD、地氟病患病率、轻重病情与水中元素质量浓度关系曲线

Fig. 3 Relationship between element mass concentration in water and sicken rate of KBD, IDD and fluorosis in Lishi-Liulin mining area

- 1. KBD 病率与水中 Se 质量浓度关系曲线; 2. 8~15 岁儿童患病率与水中 I 质量浓度关系曲线; 3. 成人患病率与水中 I 质量浓度关系曲线; 4. 地氟病患病率和病情轻—中的关系曲线; 5. 地氟病病情中—重的关系曲线; 6. 缺氟地氟病患病率与水氟质量浓度的关系曲线

东北部的方山县境内,属元素溶滤→迁移→流失的水文地球化学区,其生态环境负效应表现在人群健康方面:与元素 Se 缺乏有关的大骨节病(KBD)、碘缺乏(地甲病、克汀病)病(IDD),这些地方病的患病率和轻重程度与有关元素质量浓度的关系见图3,它们的相关方程如下:

(1)KBD 患病率及轻重程度( $y$ )与 Se 质量浓度的关系

$$y = 0.000157\rho(\text{Se})^{-2.415},$$

$$\gamma = |-0.976| > 0.708 = \gamma_{0.01}.$$

据图3和病情划分标准<sup>[6]</sup>,在吕梁山脉主峰和其附近山脊高程大的制约区内, $\rho(\text{Se}) > 0.05 \mu\text{g/L}$ 为无KBD病区; $0.05 \mu\text{g/L} \geq \rho(\text{Se}) > 0.0065 \mu\text{g/L}$ ,为患病率  $y \leq 30\%$  的轻病区; $0.0065 \mu\text{g/L} \geq \rho(\text{Se}) \geq 0.0045 \mu\text{g/L}$ ,为患病率  $30\% < y \leq 60\%$  的中病区; $\rho(\text{Se}) < 0.0045 \mu\text{g/L}$ ,为患病率  $> 60\%$  的重病区(本区无此类).

(2)碘缺乏(地甲病、克汀病)病(IDD)患病率与 I 质量浓度的关系.据水质分析资料和病情划分标准<sup>[6]</sup>获得 IDD 病患病率与 I 质量浓度的相关方程分别为:

$$y_{\text{成人}} = 28.04 \rho(\text{I})^{-0.74865},$$

$$\gamma = |-0.876| > 0.708 = \gamma_{0.01};$$

$$y_{8\sim 15岁} = 60.42 \rho(I)^{-0.54732},$$

$$\gamma = |-0.721| > 0.537 = \gamma_{0.01}.$$

(3)地氟病率与氟质量浓度间的关系. 离柳地区既在东部山区有缺氟的地方病,西部有氟过量而产生的地氟病. 据区内水质分析资料和划分标准<sup>[6]</sup>获得:

①氟过量区地氟病与氟质量浓度的关系

$$y_{轻-中} = 21.52 \rho(F)^{3.94}, (0 \leq y \leq 100),$$

$$\gamma = 0.752 > 0.354 = \gamma_{0.01};$$

$$y_{中-重} = 85.55 \rho(F)^{0.0522}, (80 \leq y \leq 100),$$

$$\gamma = 0.684 > 0.47 = \gamma_{0.01}.$$

②氟缺乏区的地氟病与氟质量浓度的关系

尽管在区内调查中访问医务部门得知,在汉高山以东和方山县城一带使用水  $\rho(F)$  小于 0.3 mg/L 的地区龋齿病流行,水  $\rho(F)$  为 0.11 mg/L 处,龋齿病达 80%,虽无确切流行病学的医学调查,但是据类似生境条件区的医学调查的资料<sup>[7,8]</sup>获得相关方程分别为:

$$y = 14.243 \rho(F)^{-0.8509},$$

$$\gamma = |-0.945| > 0.878 = \gamma_{0.01};$$

$$y_{胶东} = 9.434 \rho(F)^{-0.8635},$$

$$\gamma = |-0.969| > 0.874 = \gamma_{0.01}.$$

由上述资料可以证实:(1)生物必需的双阈元素在水文地质单元内的表现是:①在溶滤、迁移、分异、搬运和流失作用为主的水文地球化学区,生物生理负效应与元素质量浓度成负相关关系;病情轻重程度和空间上分布成负指数函数变化.②在元素聚集、溶滤、蒸发浓缩作用为主的水文地球化学环境区内某些元素过量,元素质量浓度与生物生理负效应成正相关关系;病情轻重程度和空间分布成正指数函

数变化.(2)在元素不足和过量阈区之间为元素质量浓度适宜无生理负效应区;但是人们在生产和生活、经济活动中造成的“三废”污染,使水、土、气中某些有毒元素过量产生的生物生理负效应也很明显,如在元素质量浓度适宜阈区内,因煤烟污染造成氟斑牙病(锄沟、招贤等)及三川河沿岸某些重金属元素污染显现的负效应等<sup>[9]</sup>.

参考文献:

- [1] 施罗德 H A. 痕量元素与人[M]. 陈莱玉,张祖暄,译. 北京:科学出版社,1979. 13-15.
- [2] 曹玉清,胡宽榕,胡忠毅,等. 水文地球化学反应—迁移—分异模型[J]. 长春科技大学学报,2000, (3): 251-256.
- [3] 胡宽榕,曹玉清,胡忠毅,等. 水文地质蓄水构造级、区划分及其水资源分布特点[J]. 长春科技大学学报, (3): 246-250.
- [4] 郝爱兵,李文鹏,梁志强. 利用 TDS 和  $\delta^{18}O$  确定溶滤和蒸发作用对内陆干旱区地下水咸化贡献的一种方法[J]. 水文地质工程地质,2000, (1): 4-6.
- [5] 成杭新,严光生,沈夏初,等. 化学定时炸弹:中国陆地环境面临的新问题[J]. 长春科技大学学报,1999, (1): 68-73.
- [6] 崔月犁. 卫生防病人员岗位考核指南[M]. 第三卷·下册. 北京:人民卫生出版社,1986. 485.
- [7] 梁超柯, Y Li, 王景占,等. 饮水氟与人群龋齿关系的调查研究[J]. 环境与健康杂志,1998, (2): 68-73.
- [8] 马爱华,陈培忠,王学松,等. 饮用水氟含量的探讨[J]. 数理医药学杂志,1998, 11(2): 155-156.
- [9] 胡宽榕,曹玉清,田莉玉. 与元素丰缺有关的水文地球化学生态环境模型[J]. 世界地质,2000, 19(4): 35-40.

## G. BERTRAND LAW AND E. D. WEINBERG PRINCIPLE AND THEIR POPULARIZATION

Cao Yuqing<sup>1</sup>, Hu Kuanrong<sup>1</sup>, Yu Li<sup>1</sup>, Li Shulin<sup>2</sup>

(1. *Environment and Resources College, Jilin University, Changchun 130026, China*; 2. *Team 229 of Coal Hydrogeology in Shanxi, Taiyuan 030006, China*)

**Abstract:** When studying the biologic adaptability by using biologic vital element-manganese in the laboratory, G. Bertrand found that plant can't live if there is the lack of a certain vital element and that if the element is sufficient enough, the plant may live very well, but it may be poisoned or even die if the

element is so much. While E. D. Weinberg expanded the G. Bertrand law and further revealed that certain quantity of manganese may allow some bacteria to grow well but may not be suitable for them to produce bacteriophage. Biologic vital double threshold element content and its physiological effect can be expanded to different hydrogeochemistry zones in hydrogeologic unit. In elements lixiviated (leached), transferred strongly hydrogeochemistry zone, biologic physiological effect and element content show negative correlativity. In elements enrichment, lixiviated, concentration by evaporation hydrogeochemistry zone and environment polluted by some elements superfluous, biologic physiological negative effect and element content show positive correlativity, between them which above is the element content fitting zone. Take the Lishi-Liulin hydrogeologic unit of Shanxi Province as an instance: The lack of selenium, iodine and fluorine in the hydrochemistry zone with element leaching and loss causes KBD, IDD, and tooth decay, which is in a negative correlativity with element content, respectively. While in the element lixiviation and enrichment zone, fluorine is superfluous. As a result, endemic fluorosis occurs and its sick rate shows positive correlativity with content.

**Key words:** optimum nutrition law; hydrogeochemistry zone; physiological negative effect; double threshold element.

\* \* \* \* \*

(上接 480 页)

than 31% of the increment of REE is caused by mass transfer and the other is responsible for the addition of REE into the rock from hydrothermal fluid that caused rock alteration. The acting hydrothermal fluid was characterized by low  $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$  ratio with strong positive anomaly. The reductive state of the hydrothermal fluid resulted in the loss of Eu by returning  $\text{Eu}^{3+}$  into more mobile  $\text{Eu}^{2+}$ . In other trace elements, Hf, Th, U, V, Cr, Co, Nb, Mo, Ta, Zr and Rb showed immobility, Y, Sc and Sr were carried off while Cu, Pb, Zn, Ag, Sn and Ba were introduced into altered wallrocks by hydrothermal fluid during hydrothermal alteration.

**Key words:** trace elements; geochemistry; hydrothermal alteration; metamorphic phyllite; Shuangqiaoshan Group; Yinshan deposit.