

超积累植物与找矿^①

唐世荣 黄昌勇 朱祖祥

(浙江农业大学环境与资源学院土化系,杭州 310029)

摘 要 本文介绍了超积累植物的概念和它在地质找矿中的意义,回顾了国外超积累植物的研究历史,并对应用超积累植物进行找矿的发展方向进行了讨论。

关键词 超积累植物,找矿,研究意义,研究历史,趋势。

0 前言

随着地质勘探程度的提高,愈来愈多的地表露头矿被发现并得到开发利用。结果减少了找寻露头矿的机会。但是,社会经济的发展对矿产资源的需求不断增加,迫使地质学家寻找更多的隐伏矿或盲矿。为了达到这一目的,地质探矿学家们尝试各种方法找盲矿。其中一种是植物地球化学找矿法。已有越来越多的国家在从事植物地球化学找矿效果研究,并且对这种找矿方法的重视程度逐年增加^[1~3]。由于植物地球化学找矿所用的常规指示植物的有效性相对较差,成本较高,在实际的地质找矿中应用这种方法仍存在一定的局限性。本文介绍找矿效果相对较好,命中率较高的超积累植物找矿法。

1 超积累植物的概念

超积累植物这个概念对国内多数人来说是很陌生的。它是指那些超量地累积某种或者某些化学元素的野生植物。在英文文献中,超积累植物的名称是“Hyperaccumulator”,也有人用“Accumulator”、“metallphyte”或“metal accumulating plant”。关于植物富集某种或某些化学元素要达到多少才能被列入超积累植物,目前尚没有统一的标准。这个临界值的确定取决于植物中富集的化学元素的类型(表 1)。

表 1 不同化学元素的超积累植物含量临界值

富集化学元素类型	临界值/ 10^{-6}	参考文献	富集化学元素类型	临界值/ 10^{-6}	参考文献	富集化学元素类型	临界值/ 10^{-6}	参考文献
Ni	1 000	6~9	Zn	10 000	12	Se	1 000	14
Cu	1 000(最初确定值)	10	Cd	100	13	Co	1 000	15
	500(后来确定值)	11	Mn	10 000	13			

“超积累植物”与植物地球化学找矿领域里的“指示植物”在概念方面既有相同的一面又有不同的一面。前者强调植物体内富集某种或某些化学元素的特性,并且从数量上规定要达到或超过某一临界值。如铜超积累植物中铜的含量必须在 500×10^{-6} (叶干重) 以上,否则不能

① 本文得到国家自然科学基金、中国博士后基金、农业部植物病理和生物技术重点开放实验室基金联合资助。
1996 年 10 月 3 日收稿。

视为超积累植物;后者更强调植物对矿床的指示作用,反映植物对矿石环境具有较为专一的依赖性。至于植物体内某种或者某些化学元素含量是否达到一定标准,不作硬性规定。但强调土壤中化学元素的分配类型应与植物体内化学元素的含量之间呈线性相关关系。因此,从勘探地球化学的角度看,指示植物的概念内涵更广。超积累植物既可以是找矿指示植物也可以不是找矿指示植物,因为有些超积累植物能从相对含量较低的土壤中超量地富集某种或某些元素,但这种情况少见。反过来,指示植物不一定是超积累植物。如我国长江中下游铜矿区矿床及废矿石堆上生长的找矿指示植物海州香薷,就难以列入超积累植物。如用植物叶干重表示,它们只能算作铜积累植物^[4]。

超积累植物可以按照其富集的化学元素类型分成 Cu 超积累植物、Ni 超积累植物、Se 超积累植物、Pb-Zn 超积累植物、Co 超积累植物、Mn 超积累植物、Cd 超积累植物、Al 超积累植物等等。

2 超积累植物在时、空及植物科、属内的分布特点

各种地质环境中都有超积累植物产出。多数情况下只生长在矿山区、成矿作用带或者由富含某种或某些化学元素的岩石风化而成的地表土壤中。它们常常构成一个孤立的“生态岛屿”。例如,在富镍蛇纹石风化的土壤,含菱锌矿和其它铅、锌矿物的土壤以及富铜、富钴的土壤中都有可能产出 Ni、Pb-Zn、Cu 和 Co 超积累植物。

超积累植物的地理分布也是一件很有趣的现象。以镍超积累植物为例,现已发现的 Ni 超积累植物绝大部分分布于南欧和小亚细亚^[12]、东南亚^[17]、新喀里多尼亚岛^[16]及北美加利福尼亚^[18]、西澳大利亚^[19]、津巴布韦^[20]及印度尼西亚^[17]也有几种超积累植物产出。另据 Malaisse 等^[21]统计,现已发现的铜超积累植物至少有 12 种,Co 超积累植物至少有 10 种。但这两种类型的超积累植物绝大部分产于非洲

扎伊尔沙坝(Shaba)铜矿带(前者有 9 种,后者有 8 种)。世界上象扎伊尔沙坝那样的铜矿带很多,但在这些地区很少发现有那么多的铜和钴超积累植物。可见超积累植物的地理分布是极不均匀的。这可能与土壤、气候、海拔、阳光等综合因子作用有关。

除了由于自然地质作用造成自然的毒性环境适应超积累植物生长外,人类活动对超积累植物的传播、扩散也起了不可忽视的作用。人类采矿活动为超积累植物的生存创造了新的栖息地,或者通过传播超积累植物的种子,或者通过将植物从一处移植到另一处而使某些超积累植物保存下来。因此,相当一部分超积累植物分布在人类采矿的旧遗址上。通过寻找这些地点的超积累植物可以发现古代的采矿场地,为我们提供新的找矿靶区。

超积累植物不仅在时、空上有一定的分

表 2 镍超积累植物在科、属间的分布

科	种数	属	种数	参考文献
十字花科	> 70	庭芥属	> 50	18
		遏蓝菜属	23	22
		Streptanthus 属	2	18
天料木科	> 7	天料木属	7	27
堇菜科		鼠鞭草属	3	
		堇菜属	40	18
山榄科		山榄属	40	18
无患子科		荔枝属	40	18
大风子科		卢甘属	40	18
大戟科	2	油柑属	2	30
毒鼠子科	1	毒鼠子属	1	30
楝科	1	割台树属	1	30
金莲木科	1	Brackenridgea 属	1	30
茜草科	1	九节属	1	30

注:Streptanthus、Brackenridgea 无相应的中文译名。

布特点,而且表现在植物科、属内也有一定的分布特点。以镍超积累植物为例,在已发现的 240 余种镍超积累植物中^[22],有 50 余种分布于十字花科的庭芥属内,其次为十字花科的遏蓝属、天料木科的天料木属、堇菜科的堇菜属和鼠鞭草属、山榄科的山榄属、无患子科的荔枝属、大风子科的卢甘属(表 2)。Se 超积累植物主要分布于豆科紫云属(*Astragalus*)、十字花科芸苔属(*Brassica*)和藜科滨藜属(*Atriplex*)^[10]。

3 超积累植物在地质找矿中的意义

利用超积累植物进行找矿是一种非常廉价的方法,它的潜在优势可能要比人们想象的大得多。尤其是在东南亚和南美州那些勘探程度低的地区,利用超积累植物的找矿效果更佳。一个成功的实例是 Baker 等^[23]用化学分析方法对印度尼西亚一些植物的标本进行分析后发现其中的镍含量很高,达到超积累水平。对采样地区进一步勘探后便发现一个隐伏的富镍岩体露头。超积累植物超量富集土壤中重金属的特点及在时空上,科属间的分布特点使得它在地质找矿方面具有很大的实用价值。首先,与盲目地、大量地采集植物器官进行化学分析的常规植物找矿法比较,直接利用超积累植物探矿可以避免许多人为的浪费,节约人力、物力和财力,并可提高找矿的命中率。其次,超积累植物往往具有非常发达的植物根系,能够捕捉到深部矿化的信息。在提倡找盲矿的当今时代,超积累植物更有自己广阔的应用前景。Cole^[24]认为,利用镍超积累植物多花鼠鞭草(*hybanthus floribundas* (lindl.) F. Muell)找矿有三大优点:1)这种植物的存在指示一种富镍环境,反映由超基性岩风化而成的土壤中具有很高的 Ni 含量;2)它们能指示镍地球化学异常的存在,因而可以用来辅助确定镍矿体;3)植物中的镍含量与土壤中的 Ni 含量有关,因此,植物器官的生物地球化学分析可为评价矿化品位提供有价值的信息。

4 超积累植物的研究历史与现状及展望

超积累植物的研究历史与植物地球化学找矿中的指示植物的研究历史密不可分。过去几十年的发展历史中,植物学家和植物化学家大多以矿化土壤上生长的植物作为起点来开始他们的研究工作。而生物地球化学找矿学家们则一直在这些矿化的土壤上寻找能够指示矿产存在的植物。因此,超积累植物的研究历史反映在两方面,即植物化学和植物地球化学找矿。

Minguzzi 和 Vergnano 最早发现超积累植物^[25]。他们当时在生长于意大利 Tuscany 地区的富镍蛇纹石风化土壤中找到了一种叫 *Alyssum bertolonii* desvaux (布氏香芥)的植物。该植物叶片中 Ni 的含量达到 1% (干重)。Wild^[26]在非洲发现半卡马菊(*Dicommanicolifera*)也是一种 Ni 超积累植物。Cole^[24]在西澳大利亚开展植物地球化学找矿试验研究期间,发现一种叫 *Hybanthus floribundas* (lindl.) F. Muell (多花鼠鞭草)的 Ni 超积累植物具有良好的找矿指示效果。Severne 和 Brooks^[19]在其它地方也发现了相同的 Ni 超积累植物,其干叶中 Ni 含量达 1%,叶灰分中 Ni 含量达 23%。Ni 和 Cu 都达到超积累水平。Jaffre^[27]报导了另一种 Ni 超积累植物——塞贝山榄(*Serbertia accuminata*)。该植物俗称“蓝汁”,因其皮割开后有蓝绿汁液分泌出来而得名。汁液中 Ni 含量可达 25.7% (干重),但 Co 的含量很低。上述这些发现激起了科学家们的极大兴趣,促使 Ni 超积累植物的研究飞速地向前发展。70 年代末期,Brooks 等^[28]对富 Ni 地区的植物标本进行分析后发现,Ni 超积累植物主要产于几个属(表 2)。在已鉴别出的 168 种植物中,有 45 种 Ni 超积累植物属于庭芥属(*Alyssum*)。与此同时,科学家们在 Ni 超积累植物的汁液中鉴定出含 Ni 的化合物,Ni 柠檬酸盐。并认为许多 Ni 超积累植物

也是通过柠檬酸盐与金属的耦合作用来解除 Ni 对超积累植物叶面的毒害。后来又有人发现,其它的有机酸化合物如草酸、苹果酸、氨基酸、介子油葡萄糖苷等都有解毒功能。罐装实验证实,正常植物叶面忍耐 Ni 毒性的含量范围是 $(5 \sim 300) \times 10^{-6}$,而 Ni 超积累植物的叶面 Ni 含量高达 $19\,000 \times 10^{-6}$ 时仍然保持旺盛的长势,说明 Ni 超积累植物确实存在某种解毒机理。

在 Ni 超积累植物研究快速发展的同时,其它类型的金属超积累植物如 Cu、Co、Mn、Pb、Se、Cd 和 Zn 也相继被发现^[10~15]。相比起来,它们的研究程度远不如 Ni 超积累植物。

Baker^[29]根据野外和室内研究结果提出植物吸收重金属的三种机理:1) 土壤中元素含量在达到一个临界值前,超积累植物各器官中元素的含量与其支撑基质(土壤介质)中元素的含量呈线性增长关系;2) 在土壤中重金属元素含量低的情况下,非超积累植物对土壤中金属元素的吸收存在一种限制机制。当这种限制机制超过自身的临界点时,限制机制就会发生崩溃,导致植物大量地吸收土壤中低浓度的有毒元素直至死亡;3) 完全线性吸收。植物中的元素含量与土壤中金属浓度呈直接相关关系。这一认识的获得,标志着对超积累植物的研究又迈出了一大步。进入 90 年代后,国外超积累植物的研究已出现一种崭新的局面。开始跨入多元素超积累植物比较研究、超积累植物及其共存微生物体系研究、超积累植物的分子遗传学和基因工程研究等等。

在开展超积累植物的植物化学研究的同时,国外还从事超积累植物的找矿实践。由于许多超积累植物只生长在富含重金属地区,因此,它们可以用作明显的找矿指示植物。在非洲中部,地质勘探者们用唇形科蒿莽草属(*Haumaniastrum*)植物进行探矿。十字花科 *Becium* 属^①的非洲比苏草(*Becium homlei*)也是一种很有用的铜矿指示植物。这两类植物在铜含量少于 0.01% 的土壤中难见踪迹。在西德和比利时的交界处,有几大片非常特殊的“菱锌矿植物”。其中有两种菱锌矿植物更具特征,一种属于堇菜属的 *Violacalaminaria* (芦叶堇菜);另一种是 *Thlaspi calaminare*^②。该植物开白花,属于十字花科遏蓝菜属。前者含锌约 1%,后者含锌约 1.7%。它们只生长在锌矿化地区,而远离矿区的植物通常只含 0.001%~0.02% 的锌。在欧洲其它的富锌土壤上也发现了类似的锌超积累植物。如靠近意大利与奥地利边界的 Cave del Predil 地区,*Thlaspi rotundifolium* spp. *cepacifolium*^③与铅、锌矿共生在一起。该植物含 1%~2% 的锌和 1% 左右的铅。当地的探矿者都认为,这些超积累植物能指示锌矿的存在。

我国超积累植物的研究基本上是一块处女地,超积累植物这个名词只在个别作者的文章中^[5]偶尔提及过,当然,利用超积累植物进行地质找矿的研究工作报导得更少。

纵观国内外超积累植物研究的历史,笔者认为今后应用超积累植物进行找矿的研究方向如下:

1) 加强地质学家、地球化学找矿学家与植物学家、植物分类学家的联系与合作。一方面对现已发现的地质找矿指示植物进行分门别类,了解它们在空间、时间及植物科、属内的分布特点;另一方面通过对植物标本馆内收藏的各种植物进行微量取样调查和重金属超常环境如矿山环境中的植物群落取样分析,发现更多的野生超积累植物,并将它们应用于找盲矿;

2) 建立超积累植物标本馆和数据库,以便人们认识已发现的超积累植物,并利用它们指导找矿;

3) 进一步开展超积累植物的土壤学和土壤地球化学特征研究,尤其是研究超积累植物中元素含量与土壤因子的关系,以确定化学元素在两者之间的分配类型,从而提高利用超积累植

①②③无相应的中文译名。

物进行找矿的有效性;

4) 开展科普宣传教育,把现有的找矿效果好的超积累植物知识普及到民众中去,依靠群众的力量找出更多的超积累植物旺盛生长区,请他们采集超积累植物和土壤样品送地质化验单位分析,以确定是否进一步在这些地区开展找矿普查和详查工作,这种做法在人烟稀少、植被茂盛的地区将会收到更明显效果。

5 结论

超积累植物是一个很新的研究领域,由于超积累植物的时空分布特点和在植物科属间的分布特点,利用超积累植物找盲矿较其它的植物地球化学找矿法具有更为明显的优势,不仅可以节省人力、物力、财力,而且可以提高找矿的命中率。

参 考 文 献

- [1] 孔牧、任天祥、孔令韶、马华,论勘查地球化学研究的发展,国外地质勘探技术, No. 3, 1995。
- [2] 任天祥、李立、张华,俄罗斯的勘查生物地球化学——赴俄罗斯考察见闻,国外地质勘探技术, No. 2, 1993。
- [3] 胡西顺,金矿的植物地球化学勘查,国外地质勘探技术, 8(4): 1992。
- [4] 谢学锦、徐邦梁,铜矿指示植物海州香薷,地质学报, No. 4, 1954。
- [5] 邹邦基,植物的微量元素,微量元素的农业化学,农业出版社, 1991。
- [6] Brocks, R. R. and E. D. Wither. Nickel accumulation by *Rinorea bengalensis* (Wall.) O. K., J. Geochem. Explor. 7: 295 ~ 300, 1977.
- [7] Brooks, R. R. and Radford, C. C., Nickel accumulation by European species of the genus *Alyssum*. Proc. Roy. Soc. Lond. Sec. B. 217 ~ 224, 1978.
- [8] Brooks, R. R., Morrison, R. S., Dudley, T. R., and Alman, Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linnaeus* (Cruciferae), Proc. Roy. Soc. London Sec. B 203, 397 ~ 403, 1979.
- [9] Brooks, R. R., Morrison, R. S., Reeves, R. D., Dudley, T. R., and Akman. Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linnaeus* (Cruciferae). Proc. Roy. Soc. Lond. Sec. B, 203, 387 ~ 403, 1979.
- [10] Brooks, R. R. Copper and cobalt uptake by *Haumanistrum* species. Plant Soil. 48: 541 ~ 544, 1977.
- [11] Brooks, R. R., R. S., Morrison, R. D., Reeves, and F. Malaisse, Copper and cobalt in Africa species of *Aeolanthus mart* (*Plectranthinae*, Labitae). Plant and Soil, 50: 503 ~ 507, 1978.
- [12] Reeves, R. D., and R. R. Brooks, Hyperaccumulation of lead and zinc by two metallophytes from a mining area of Central Europe. Bnviron. Pollut. Ser. A31: 277 ~ 287, 1983.
- [13] Brown, S. L., R. L. Chaney, J. S. Angle, and A. J. M., Baker, Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J., 59: 125 ~ 133. 1995.
- [14] Rosenfeld, I., and O. A., Beath. Selenium, geobotany, biochemistry, toxicity and nutrition. Academic Press, New York. 1964.
- [15] Banuelos, G. S. and D. W. Meek. Accumulation of Selenium in plants grown on selenium - treated soil. J. Bnviron. Qual., 19: 772 ~ 777, 1990.
- [16] Jaffre, T. Vegetation des roches ultrabasiqes en Nouvelle Caledonie. O. R. S. T. O. M., Pairs. 1980.
- [17] Brooks, R. R., J. Lee, R. D. Reeves, and T. Jaffre. Detection fo nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. J. Geochem. Explor. 7: 49 ~ 57, 1977.
- [18] Reeves, R. D., Brooks, R. R. and Macfarlane, R. M. Nickel uptake by Californian *Streptanthus* and *Caulanthus* with particular reference to the hyperaccumulator *S. Polygaloides* Gray (Brassicaceae). Am. J. Bot. 68: 708 ~ 712, 1981.
- [19] Severne, B. C., and R. R. Brooks. 1972. A nickel - accumulating plant from Western Australia. Planta 103: 91 ~ 94. 1972.
- [20] Wild, H. Geobantanical anomalies in Rhodesia. 3. The vegetation of nickel - bearing soils. Kirkia 7, Suppl. 1 ~ 62, 1970.

- [21] Malaisse, F., J. Gregoire, R. R. Brooks, R. S. Morrison, and R. D. Reeves. 1978. *Aeolanthus biformifolius* De Wild. : A hyperaccumulator of copper from Zaire. *Science* 199: 887 - 888, 1978.
- [22] Bernal, M. P., S. P. McGrath, A. J. Miller and A. J. M. Baker. Comparison of the chemical changes in the rhizosphere of the nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* with the non - accumulator *Raphanus sativas*. *Plant and Soil*. 164:251 ~ 259, 1994.
- [23] Baker, A., R. Brooks, and R. Reeves. Growing for gold - and copper - and zinc. *New Scientist*, 117(1603): 44 ~ 48, 1988.
- [24] Cole, M. M. Geobotanical and Biogeochemical investigations in the sclerophyllous woodland and shrub associations of the Eastern goldfields area of Western Australia, with particular reference to the role of *Hybanthus Floribundas* (Lindl.) F. Muell. as a nickel indicator and accumulator plant. *J. Appl. Ecol.* 10: 2269 ~ 2276, 1973.
- [25] Mniguzzi, C. and Vergnano, O. Il contenuto di nichel nelle ceneri di *Alyssum bertolonii* Desv. *Mem. Soc. Tose. Sci. Nat. Ser. A* 55: 49 - 77, 1948.
- [26] Wild, H. The taxonomy, ecology and possible method of evolution of a new metalliferous species of *Dicoma* cass. (Compositae). *Mitt. Bot. Staatssamml. Munchen* 10: 266 ~ 274, 1971.
- [27] Jaffre, T., R. R. Brooks, J. Lee, and R. D. Reeves. *Sebertia acuminata*: a Hyperaccumulator of nickel from New Caledonia. *Science* 193: 579 - 580, 1976.
- [28] Brooks, R. R., R. S. Morrison, R. D. Reeves, T. R. Dudley, and Y. Akman. Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linneaus* (Cruciferae). *Proc. Roy. Soc. Lond.* B2203: 387 ~ 403, 1979.
- [29] Baker, A. J. M., Accumulators and excluders: Strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.*, 3: 643 ~ 654.
- [30] Homer, F. A., R. D. Reeves, R. R. Brooks, and A. J. M. Baker. Characterization of the nickel - rich extract from the nickel hyperaccumulator *Dichapetalum Gelonioides*. *Phytochemistry*. 30(7): 2141 ~ 2145, 1991.

SUPERCUMULATIVE PLANTS IN RELATION TO ORE PROSPECTING

Tang Shirong, Huang Changyong, Zhu Zuxiang

(Department of Soil Chemistry, College of Environment and Resources,

Zhejiang Agricultural University, Hangzhou 310029)

Abstract This paper elucidates the concept of the supercumulative plant and its significance in geological ore - prospecting, reviews the history of supercumulative plant studies abroad, and deals with the future trend of applying supercumulative plants to ore prospecting.

Key words supercumulative plant, ore prospecting, significance of research, research history, trend.

第一作者简介 唐世荣,男,1963年5月生,汉族,广西全州县人。1983年获桂林工学院应用化学系地球化学找矿专业学士学位,1992年获成都理工大学应用化学系矿床专业理学硕士学位,1995年获中国科学院地质研究所沉积专业理学博士学位。现在浙江农业大学环境与资源学院土化系做博士后。研究兴趣:地球化学与植物环境生态学。