

网络出版时间:
网络出版地址:

青海沙棘原汁中微量元素含量的测定及其聚类分析

朱利娜^{1,2}, 索有瑞¹

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

【摘要】 **【目的】**测定青海不同地方沙棘原汁中微量元素的含量, 并进行聚类分析, 为沙棘资源的开发提供依据。**【方法】**采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法, 测定青海东部地区 21 个采样点沙棘原汁中的 Fe、Zn、Mn、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Cd 8 种微量元素的含量, 并采用 SPSS 16.0 统计软件对其样品进行聚类分析。**【结果】**青海沙棘原汁中 Fe、Zn、Mn、Cu、Ni 和 Cr 的平均含量分别为 14.94、2.06、1.88、0.69、0.19 和 0.14 mg/L, Pb 和 Cd 的含量分别是 28.97 和 4.76 $\mu\text{g/L}$ 。产地是影响 21 个沙棘样品聚类结果的主要因素, 相同产地的样品多聚为一类; 但由于沙棘原汁中的微量元素含量受多种因素影响, 仅靠微量元素含量不能对其样品进行合理归类。**【结论】**青海沙棘原汁中的 Fe 含量丰富, 重金属含量低, 具有较好的开发利用价值。

【关键词】 沙棘原汁; ICP-MS; 微量元素; 聚类分析

【中图分类号】 S793.6

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)11-0197-05

Determination and cluster analysis of trace elements in seabuckthorn juice from Qinghai province

ZHU Li-na^{1,2}, SUO You-rui¹

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: **【Objective】** The contents of trace elements in seabuckthorn juice were determined and a cluster analysis was conducted to provide information on future development of seabuckthorn resources. **【Method】** The contents of elements such as Fe, Zn, Mn, Cu, Cr, Ni, Pb and Cd in seabuckthorn juice collected from 21 regions in Qinghai province were determined using ICP-MS and the cluster analysis was conducted by SPSS 16.0. **【Result】** The average concentrations of Fe, Zn, Mn, Cu, Ni and Cr were 14.94, 2.06, 1.88, 0.69, 0.19 and 0.14 mg/L and the average concentrations of Pb and Cd were 28.97 and 4.76 $\mu\text{g/L}$ in the seabuckthorn juice. Samples from same sites were classified to one type because place of origin was the main classification factor. As the contents of trace elements in seabuckthorn juice were affected by many factors, seabuckthorns can not be classified correctly by cluster analysis only. **【Conclusion】** The most abundant element in seabuckthorn juice is Fe and the contents of heavy metals are very low. Thus, exploitation of seabuckthorns has good economic benefits.

Key words: seabuckthorn juice; ICP-MS; trace elements; cluster analysis

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)是胡颓子科 沙棘属落叶灌木或小乔木^[1]。藏医名著《月王药诊》

【收稿日期】 2012-03-21

【基金项目】 国家自然科学基金项目(30873158); 青海省重大科技专项(2009A2-2)

【作者简介】 朱利娜(1987—), 女, 河南安阳人, 在读硕士, 主要从事天然药物化学研究。E-mail: tyzhln@126.com

【通信作者】 索有瑞(1960—), 男, 青海西宁人, 研究员, 博士生导师, 主要从事天然药物化学及高原特色生物资源开发研究。
E-mail: yrsuo@nwipb.ac.cn

和《四部医典》中有利用沙棘果治疗肺部疾病、肺肿胀、热性“培根”病、“术布”病和胃病的记载^[2]。《中医大辞典》中记载沙棘果具有活血散瘀、化痰宽胸、补脾健胃、生津止渴、清热止泻等功效^[3]。目前市场上已出现由沙棘原汁加工成的沙棘饮料、沙棘酒、沙棘醋等一系列产品,天然、绿色、保健、营养丰富的沙棘产品已越来越受到人们的青睐^[4-5]。近年来,对沙棘的研究主要集中于有机化学成分、药理作用及其生态价值等方面^[6-8],而对沙棘原汁微量元素含量的研究报道较少。为此,本研究采用湿法消解和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法,测定了青海省东部地区沙棘原汁中的 8 种微量元素的含量,并进行了

聚类分析,以期 为沙棘资源的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

沙棘成熟鲜果采自青海省东部地区(表 1),经中国科学院西北高原生物研究所索有瑞研究员鉴定为中国沙棘(*H. rhamnoides* subsp. *sinensis* Rou-si)。果实均带枝采摘,放在-20℃冰箱中冻硬后摘下,分别用自来水、纯净水冲洗干净,晾干表面水分,挤压成汁,过滤,备用。记录沙棘果实的颜色并测定百果质量。

表 1 沙棘果的采样信息
Table 1 Simple information of seabuckthorn fruits

样品编号 No.	采样地 Collect site	海拔/m Elevation	果实颜色 Fruit color	百果质量/g 100-fruit weights	沙棘林类型 Type of seabuckthorn plantations
1	大通朔北乡边麻沟 Bianmagou Villige, Shuo-bei Township, Datong County	3 011	黄色 Yellow	17.47	人工林 Plantation
2	大通宝库乡棉柳台 Mianliutai Villige, Baoku Township, Datong County	2 801	橙黄 Orange	16.23	人工林 Plantation
3	大通宝库乡哈家嘴村 Hajiazui Villige, Baoku Township, Datong County	3 054	橙黄 Orange	16.16	人工林 Plantation
4	互助边滩乡仓家村 Cangjia Villige, Biantan Township, Huzhu County	3 120	黄色 Yellow	7.08	天然林 Natural forest
5	互助林川乡马场村 Machang Villige, Linchuan Township, Huzhu County	2 867	黄色 Yellow	6.84	天然林 Natural forest
6	互助丹麻乡东家村 Dongjia Villige, Danma Township, Huzhu County	2 672	黄色 Yellow	6.36	杨树-沙棘混交林 Mixed forest
7	乐都达拉乡烂泥滩 Lannitan Villige, Dala Township, Ledu County	2 788	黄色 Yellow	7.56	纯林 Pure forest
8	乐都李家乡干沟岭 Gangouling Villige, Lijia Township, Ledu County	2 801	黄色 Yellow	8.22	人工林 Plantation
9	平安三合镇翻身村 Fanshen Villige, Sanhe Town, Ping'an County	2 652	黄色 Yellow	13.38	纯林 Pure forest
10	平安洪水泉乡阿吉营村 Ajiying Villige, Hongshuiquan Township, Ping'an County	2 921	橙黄 Orange	12.71	次生林 Secondary forest
11	平安石灰窑乡红崖村 Hongya Villige, Shihuiyao Townshop, Ping'an County	2 808	橙黄 Orange	12.52	次生林 Secondary forest
12	循化白庄镇苏乎沙村 Suhusha Villige, Baizhuang Town, Xunhua County	2 661	橙黄 Orange	16.19	纯林 Pure forest
13	循化街子镇吾土贝那亥 Wutunahai Villige, Jiezi Town, Xunhua County	2 546	橙黄 Orange	12.92	纯林 Pure forest
14	化隆沙连堡乡冶二村 Ye'er Villige, Shalianbao Township, Hualong County	2 976	橙黄 Orange	12.66	纯林 Pure forest
15	化隆德恒隆乡纳加村 Najia Villige, Dehenglong Township, Hualong County	2 896	橙黄 Orange	11.04	纯林 Pure forest
16	化隆查甫乡药水泉村 Yaoshuiquan Villige, Chafu Township, Hualong County	3 031	橙黄 Orange	10.77	沙棘-杨树混交林 Mixed forest
17	湟中丹麻乡马昌沟村 Machanggou Villige, Danma Township, Huangzhong County	2 878	橙黄 Orange	12.87	纯林 Pure forest
18	湟中共和乡盘道村 Pandao Villige, Gonghe Township, Huangzhong County	2 877	黄色 Yellow	9.12	纯林 Pure forest
19	门源浩门镇老虎沟 Laohugou Villige, Haomen Township, Menyuan County	2 958	橙黄 Orange	15.36	纯林 Pure forest
20	门源泉口镇泉台村 Goutai Villige, Quankou Town, Menyuan County	2 747	橙红 Salmon pink	13.72	纯林 Pure forest
21	门源仙米乡梅花村 Meihua Villige, Xianmi Township, Menyuan County	2 649	橙红 Salmon pink	13.55	天然林 Natural forest

1.2 仪器与试剂

ELAN DRC-e 电感耦合等离子体质谱仪(美国 PE 公司);可调式电热板(北京科伟仪器有限公司);SHHS/T-D1200 豪华型通风橱(上海沪试分析仪器有限公司);优普 UPT 系列超纯水器(成都超纯科技有限公司)。

Fe、Zn、Mn、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Cd 等标准储备液 1 000 μg/mL(国家标准物质研究中心);HNO₃(分析纯,白银良友化学试剂有限公司);30% H₂O₂(分析纯,天津市河东区红岩试剂厂);水为超纯水。

1.3 方 法

1.3.1 样品消化与测定 准确吸取 5 mL 沙棘果汁放入 50 mL 锥形瓶中,加入 10 mL HNO₃,静置 1 h 后再加入 2 mL H₂O₂,摇匀,置于通风橱内过夜。次日放于电热板上,低温(80~100 ℃)消解 1 h,再加热(150~180 ℃)消化至黄烟变为白烟,样品溶液呈无色,冷却至室温后,用超纯水洗涤并定容于 50 mL 容量瓶中。用同样方法制备空白溶液。

采用 ICP-MS 法,测定待测样中 Fe、Zn、Mn、Cu、Cr、Ni、Pb、Cd 的含量。仪器工作参数为:发射功率 1 175 W,冷却气流量 15 L/min,辅助气流量

1.2 L/min,雾化气流量 0.84 L/min,采样锥孔径 1.1 mm,扫描方式为跳峰,停留时间 30 ms/点,泵速 24 r/min,扫描次数 20 次,截取锥孔径 0.9 mm。样品 3 次测定的 RSD 均小于 5%。

1.3.2 聚类分析 在聚类分析之前,为消除各元素间的含量差异对结果的影响,需对原始数据进行标准化处理^[9]。经过标准化预处理的变量(每 1 列元素)权重相同,平均值都为 0,方差或标准偏差均为 1^[10]。然后用 SPSS 16.0 统计软件对 21 个采样点的沙棘进行聚类分析,聚类距离采用欧氏距离平方法,聚类方法采用 Ward 法^[11]。

2 结果与分析

2.1 沙棘原汁中的微量元素含量

从表 2 可以看出,不同采样点沙棘原汁中的 8 种微量元素含量变异系数在 30.72%~49.19%,Ni 和 Pb 元素在不同地区沙棘原汁中的含量变化最明显;沙棘原汁中人体必需微量元素 Fe、Zn、Mn 的含量丰富,而重金属 Cu、Ni、Cr、Pb 和 Cd 的含量较低,符合果、蔬汁饮料卫生标准^[12]要求。青海沙棘原汁中的 Fe 元素平均含量高于陕西产沙棘^[13]。

表 2 青海不同采样地沙棘原汁中的微量元素含量

Table 2 Content of mineral elements in seabuckthorn juice from different regions of Qinghai province

样品编号 No.	Fe/ (mg·L ⁻¹)	Zn/ (mg·L ⁻¹)	Mn/ (mg·L ⁻¹)	Cu/ (mg·L ⁻¹)	Ni/ (mg·L ⁻¹)	Cr/ (mg·L ⁻¹)	Pb/ (μg·L ⁻¹)	Cd/ (μg·L ⁻¹)
1	18.56	2.22	2.49	0.44	0.09	0.14	50.35	8.44
2	12.88	1.27	1.26	0.54	0.04	0.12	17.45	4.30
3	13.94	2.30	1.65	0.74	0.06	0.15	46.65	4.33
4	13.60	1.75	2.07	0.32	0.05	0.15	13.80	3.69
5	28.99	1.67	3.24	0.54	0.19	0.27	20.80	3.55
6	18.13	1.78	1.84	0.80	0.30	0.20	35.70	2.76
7	19.07	2.47	1.57	0.93	0.27	0.22	45.20	5.59
8	17.92	3.17	1.26	0.92	0.23	0.21	47.85	3.56
9	10.00	1.53	1.35	0.79	0.26	0.08	42.05	5.10
10	14.70	2.17	1.22	0.94	0.16	0.09	40.40	8.22
11	13.23	2.67	1.45	0.91	0.18	0.05	38.95	7.76
12	23.09	3.81	4.94	0.64	0.31	0.24	29.20	4.03
13	13.06	3.34	2.05	0.59	0.15	0.23	37.15	2.85
14	10.58	1.36	1.20	0.37	0.20	0.10	27.10	4.82
15	11.72	1.05	1.82	0.67	0.32	0.11	8.40	7.56
16	7.67	1.10	1.93	0.45	0.27	0.07	7.15	4.87
17	12.93	1.26	2.14	0.87	0.31	0.05	25.10	4.56
18	17.75	4.13	1.88	0.47	0.21	0.12	33.80	6.47
19	18.55	1.12	1.65	0.72	0.03	0.07	16.50	2.35
20	8.62	1.85	1.15	1.04	0.25	0.12	6.05	2.03
21	8.84	1.28	1.31	0.90	0.17	0.12	18.65	3.19
平均值 Mean	14.94	2.06	1.88	0.69	0.19	0.14	28.97	4.76
标准差 SD	5.17	0.91	0.86	0.21	0.09	0.07	14.25	1.93
变异系数/% CV	34.62	44.31	45.95	30.72	49.00	47.39	49.19	40.52

2.2 聚类分析

21 个采样点的沙棘原汁微量元素含量原始数据经过处理后,得到一个新的 21×8 的数据矩阵,利用 SPSS 16.0 软件进行聚类分析,得到 21 个来源不同的沙棘样品的聚类树状图(图 1)。

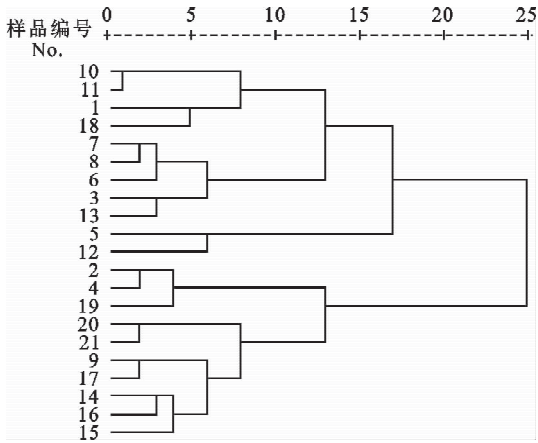


图 1 青海 21 个沙棘样品的聚类分析结果

Fig. 1 Cluster dendrogram of twenty-one seabuckthorn samples

由图 1 可见,当欧氏距离为 20 时,21 个沙棘样品被聚类为 2 大类群,1,3,5~8,10~13,18 号样品为Ⅰ类,2,4,9,14~17,19~21 号样品为Ⅱ类,即除 2,4,9,17 和 18 号外,采自大通、互助、乐都、平安和循化的沙棘聚为一类,采自化隆和门源的沙棘聚为一类,除 20 和 21 号沙棘果为橙红色外,2 大类中均含有黄色和橙黄色沙棘果,说明基于微量元素的聚类分析,产地是影响沙棘样品相似程度的重要因素。结合表 2 可知,1 和 3 号沙棘原汁中 Pb 元素含量明显高于 2 号,18 号沙棘原汁中的 Zn 元素含量比 17 号高,在聚类时也被分到了不同类群中。

当欧氏距离为 15 时,21 个样品被聚类为 3 类,与距离为 20 时相比,Ⅱ类不变,5 和 12 号从Ⅰ类中独立为一个类群,分析原因在于二者的 Mn 和 Cr 元素含量均较高。

当欧氏距离为 10 时,21 个沙棘样品被分为 5 类,第 1 类是 1,10,11 和 18 号;第 2 类是 3,6,7,8 和 13 号;第 3 类是 5 和 12 号;第 4 类是 2,4 和 19 号;第 5 类是 9,14,15,16,17,20 和 21 号。可见,采样地相近的样品多聚为一类,如 10 和 11 号,7 和 8 号,14,15 和 16 号,20 和 21 号等。但采集于大通地区的 1~3 号和来自互助地区的 4~6 号样品却分别聚在 3 个不同类中;也有采集地相聚较远,果实颜色和百果质量差异较大的样品聚在一起的现象,如 1

和 18 号,5 和 12 号,2 和 4 号等。这种情况在前人的研究中也出现,如张崇玉等^[13]对陕西沙棘原汁中矿质元素的分析结果显示,不同地区沙棘原汁中的金属元素含量各不相同,且同一地区外观表现不同的沙棘原汁中的金属元素含量也不同,阴坡地和阳坡地的样品也存在差异;陈进福^[14]对青海东部沙棘的结实特性与规律的研究发现,沙棘百果质量与树龄呈负相关关系。可见树龄、坡向、土壤元素背景值以及试验误差等均会影响沙棘原汁中微量元素的含量,以致出现与产地、果实性状不符的样品聚类。综合分析 3 个欧氏距离的聚类结果可知,虽然青海各地沙棘原汁中微量元素含量受多种因素的影响,但相同产地的样品多聚为一类,说明产地是影响 21 个沙棘样品聚类的主要因素,这也是很多文献报道中通过矿质元素含量的聚类来判别样品产地的重要原因^[9-11]。

3 讨论与结论

中国沙棘是以多态型存在的复杂的种群系统,树型、棘刺、果色、果型、果实大小、种子大小等,均有很大幅度的变异^[15]。廉永善^[16]通过对沙棘性状的数量变异和地理变异研究,认为种下类型的差异根源应归属于遗传因子,并按照各性状的主成分分析、变异系数、遗传力等,将四川和甘肃产的中国沙棘划为 21 个种下类型,实质上又包括着生态型和生物学 2 个等级。所以沙棘种下类型的划分尚无比较恰当的依据和可行的标准。

本研究中采样沙棘有的是生长于河滩地的天然林,有的是荒山造林或退耕还林,其果实属于高原特色浆果,果实较小,百果质量为 6.36~17.47 g,果实颜色存在差异。由于青藏高原太阳辐射强,昼夜温差大,海拔高等独特的自然环境,该地区沙棘果中的营养成分和生物活性明显高于其他地区^[17],特别是维生素 C 的含量,果实越小含量越高^[14],而且该地区沙棘生长环境中的空气清洁、尘埃少、受人类活动的影响小,生产的沙棘是真正的纯天然绿色浆果。

本研究结果显示,由于沙棘原汁中微量元素的含量受遗传和环境(如水、土壤)^[18]等多种因素的影响,因此不能简单地依靠微量元素含量进行聚类。从资源开发角度而言,虽然微量元素含量有别并不影响沙棘的工业生产和产品品质,但也说明需要加大对高原沙棘的科技投入,以培育出性状稳定、适应性强的高产沙棘品种;同时在选择优质沙棘原料产区时,应多考虑种植区的环境背景,尽量远离公路,

矿企等,以减少林区土壤重金属污染和累积。

[参考文献]

- [1] Tian C J, Nan P, Chen J K, et al. Volatile composition of Chinese *Hippophae rhamnoides* and its chemotaxonomic implications [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2004, 32: 431-441.
- [2] 马桔云,程明,战丹. 沙棘化学成分的研究进展 [J]. 黑龙江医药, 2001, 14(3): 208-209.
Ma J Y, Cheng M, Zhan D. Advances in chemical constitution of seabuckthorn [J]. Heilongjiang Medicine Journal, 2001, 14(3): 208-209. (in Chinese)
- [3] 金婷,徐雅琴,李兴国. 沙棘中活性物质及其应用 [J]. 沙棘, 2005, 18(2): 24-26.
Jin T, Xu Y Q, Li X G. Bioactive substances of seabuckthorn and their applications [J]. Hippophae, 2005, 18(2): 24-26. (in Chinese)
- [4] 何志勇,夏文水. 沙棘果汁营养成分及保健作用 [J]. 食品科技, 2002(7): 69-71.
He Z Y, Xia W S. Nutritional ingredients and medicinal use of seabuckthorn juice [J]. Food Science and Technology, 2002(7): 69-71. (in Chinese)
- [5] 朱万靖,倪培德,江志炜. 沙棘资源开发与沙棘黄酮提取 [J]. 中国油脂, 2000, 25(5): 46-48.
Zhu W J, Ni P D, Jiang Z W. Exploitation of seabuckthorn resource and extraction of flavone [J]. China Oils and Fats, 2000, 25(5): 46-48. (in Chinese)
- [6] Geetha, Asheesh. Medicinal and therapeutic potential of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2011, 138: 268-278.
- [7] 李晓花,孔令学,刘洪章. 沙棘有效成分研究进展 [J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(2): 162-167.
Li X H, Kong L X, Liu H Z. Advances on effective compositions of seabuckthorn [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2007, 29(2): 162-167. (in Chinese)
- [8] 于荣. 沙棘资源价值及开发利用 [J]. 青海农林科技, 2011(3): 83-84.
Yu R. Discussed about resource value and utilization on *Hippophae rhamnoides* [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2011(3): 83-84. (in Chinese)
- [9] 史秀红,常璇,袁毅,等. 宁夏中卫内蒙乌拉特前旗和山东枸杞微量元素的聚类分析研究 [J]. 时珍国医国药, 2010, 21(6): 1332-1334.
Shi X H, Chang X, Yuan Y, et al. Study on the cluster analysis of elements in wolf berry from Ningxia and Shandong by flame atomic absorption spectrometry [J]. Lishizhen Medicine and Material Medica Research, 2010, 21(6): 1332-1334. (in Chinese)
- [10] 周利兵,姜紫勤,吴启勋. 青海地区白刺叶中微量元素的主成分分析与聚类分析 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(13): 6649-6650, 6652.
Zhou L B, Jiang Z Q, Wu Q X. Principal component analysis and cluster of trace elements in plant *Nitraria* leaf from Qinghai region [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(13): 6649-6650, 6652. (in Chinese)
- [11] 刘小芳,薛长湖,王玉明,等. 刺参中无机元素的聚类分析和主成分分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(11): 3119-3122.
Liu X F, Xue C H, Wang Y M, et al. Principal component analysis and cluster analysis of inorganic elements in sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(11): 3119-3122. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国卫生部. GB 19297—2003 果、蔬汁饮料卫生标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 1-3.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 19297—2003 Hygienic standard for fruit and vegetable juice [S]. Beijing: China Standard Press, 2004: 1-3. (in Chinese)
- [13] 张崇玉,赵振东,佟霁云,等. 不同沙棘原汁中 16 种矿质元素的分析 [J]. 西北农业大学学报, 1989, 17(4): 109-112.
Zhang C Y, Zhao Z D, Tong J Y, et al. An analysis of 16 kinds of mineral elements in different seabuckthorn raw [J]. Acta Univ Septentrionali Occident Agric, 1989, 17(4): 109-112. (in Chinese)
- [14] 陈进福. 中国沙棘结实特征与规律的研究 [J]. 青海农林科技, 1992(4): 18-21.
Chen J F. Study on the fruiting characteristics and regularities of seabuckthorn [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 1992(4): 18-21. (in Chinese)
- [15] 黄铨,佟金权. 兴隆山自然保护区中国沙棘种群表型结构研究 [J]. 林业科学, 1993, 29(3): 257-261.
Huang Q, Tong J Q. Study on the population phenotype structure of *Hippophae rhamnoides* in Xinglongshan nature reserve [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29(3): 257-261. (in Chinese)
- [16] 廉永善. 沙棘属植物生物学和化学 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2000: 117-125.
Lian Y S. Biology and chemistry of the genus *Hippophaea* [M]. Lanzhou: Gansu Scientific and Technical Publishers, 2000: 117-125. (in Chinese)
- [17] 郑杰. 青海沙棘产业发展应注意的问题 [J]. 青海科技, 2008(4): 6-10.
Zheng J. The important issues on the development of seabuckthorn in Qinghai province [J]. Qinghai Science and Technology, 2008(4): 6-10. (in Chinese)
- [18] 胡省英,冉伟彦,范宏瑞. 土壤-作物系统中重金属元素的地球化学行为 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 84-87.
Hu S Y, Ran W Y, Fan H R. Geochemical behavior of heavy metals in soil-crop system [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 84-87. (in Chinese)