

不同复合种植模式滇龙胆中矿质元素化学计量学研究

董晓蕾^{1,2},张 霁¹,赵艳丽¹,金 航¹,王元忠^{1*}

(1. 云南省农业科学院 药用植物研究所, 云南 昆明 650200; 2. 云南中医学院 中药学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为了研究不同复合种植模式滇龙胆的矿质元素计量特征,探讨滇龙胆药材化学成分及其疗效的影响因素,采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定4种植模式(单一种植、茶树+滇龙胆、早冬瓜+滇龙胆、杉木+滇龙胆)下滇龙胆(根、茎、叶)及其生长土壤中8种矿质元素(B、Ca、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni和Zn)的含量,结合多元统计分析方法对其所含元素计量特征进行分析和评价。结果表明,不同种植模式滇龙胆中均含有丰富的Ca、Fe、Mn等多种矿质元素,Mo元素均未检出(<0.15 μg/g);单一种植滇龙胆叶中Ca元素含量最高,达8 181 μg/g,根中Fe元素含量最高,达2 228 μg/g,早冬瓜+滇龙胆复合种植的叶片中Mn元素含量最高,达910 μg/g。同一种植模式滇龙胆根、茎、叶中Ca、Cu、Fe、Mn、Ni元素含量均差异显著($P < 0.05$)。不同种植模式滇龙胆中Fe、Mn元素含量差异很大。单一种植及早冬瓜+滇龙胆、杉木+滇龙胆复合种植下,滇龙胆与土壤中部分元素含量具有一定相关性。不同种植模式的滇龙胆对矿质元素的富集能力差异较大,其中对Ca、Cu、Mn、Zn元素的富集能力较强,茶树+滇龙胆种植模式下的叶片对Cu元素的富集能力最强。多元统计分析和滇龙胆生物富集系数分析表明,滇龙胆自身的生物学特性及种植模式影响体内矿质元素的分布特征。

关键词: 滇龙胆; 复合种植; 矿质元素; 计量特征

中图分类号: S567.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)06-0113-06

Mineral Element Stoichiometry Characteristic of *Gentiana rigescens* from Different Multiple Cropping Systems

DONG Xiaolei^{1,2}, ZHANG Ji¹, ZHAO Yanli¹, JIN Hang¹, WANG Yuanzhong^{1*}

(1. Institute of Medicinal Plants, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650200, China;

2. College of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, China)

Abstract: To analyze elements stoichiometry characteristic in different planting patterns and investigate the factors that affected the chemical composition and the curative effect of *Gentiana rigescens*, the contents of eight mineral elements (B, Ca, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni and Zn) in *G. rigescens* (root, steam and leaf) collected from four different planting patterns (monoculture, planting with *Camellia sinensis*, *Alnus nepalensis* and *Cunninghamia lanceolata*) and their planting soil were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), and multivariate analyses were used for analysis. The results showed that the content of Mo was not detected (<0.15 μg/g), but the contents of Ca, Fe and Mn were rich among different samples. The leaf of monoculture had the highest content of Ca (8 181 μg/g), the root of monoculture had the highest content of Fe (2 228 μg/g), the leaf of *G. rigescens* planting with *A. nepalensis* had the highest content of Mn (910 μg/g). The contents of Ca, Cu, Fe, Mn and Ni were significantly different at the 0.05 level in different organs in the same planting pattern. In different planting patterns, the contents of Fe and Mn were different in *G. rigescens*. The elemental contents in the

收稿日期:2014-12-20
基金项目:国家自然科学基金项目(81260608); 云南省自然科学基金项目(2013FD066,2013FZ150)
作者简介:董晓蕾(1990-),女,吉林桦甸人,在读硕士研究生,研究方向:中药资源开发与利用。E-mail:dxl516@126.com
* 通讯作者:王元忠(1981-),男,云南怒江人,助理研究员,主要从事药用植物资源化学研究。E-mail:boletus@126.com

sample of monoculture and the sample planting with *C. lanceolata* and *A. nepalensis* were significantly correlated with the contents of some elements in their planting soil. The mineral elements absorption rates of *G. rigescens* were different in different planting patterns, and the absorption abilities for Ca, Cu, Mn and Zn were higher than other elements in *G. rigescens*, the absorption ability for Cu was the highest in the leaf of *G. rigescens* which was planting with *C. sinensis*. Multivariate analysis and the bioconcentration factor indicated that the biological characteristics of *G. rigescens* and the planting patterns had an impact on the element distribution.

Key words: *Gentiana rigescens*; multiple cropping; mineral elements; stoichiometry characteristic

复合种植具有集约利用土地、光、水分、养分等自然资源,减少病虫害,抑制杂草,实现农业高产高效等优点,有利于地区经济发展,增加农民收入,对我国农业可持续发展具有重要意义^[1-2]。复合种植能改变植物生长的局部生态小环境,诱导土壤基质中有机质和营养元素的空间分布差异,引起生长特征发生变化^[3-4]。林药复合种植是对传统中药材种植模式的优化,可合理利用现有耕地,提高生产效率,实现种植地的可持续利用,具有显著的生态和经济效益^[5-6]。

植物不同器官的生理机能不同,导致体内化学元素分布存在差异^[7-8]。元素分布特征不仅是自身的遗传特征,同时也受所处生境的影响,是生物学特性与环境条件相统一的结果^[9]。土壤矿质元素及理化特性不同导致形成的化学环境不同^[10]。植物主要从土壤中吸收矿质元素,不同环境使其体内矿质元素分布具有较大差异^[11-12]。元素计量特征可探究元素含量与环境间的相互作用关系^[13]。因此,分析复合种植植物元素计量特征对农作物和经济林木的科学栽培研究具有重要意义。

滇龙胆(*Gentiana rigescens*)为龙胆科龙胆属多年生宿根草本植物,具有清热燥湿、泻肝定惊等功效^[14]。现代研究表明,滇龙胆主要用于治疗肝胆疾病、皮肤病、慢性支气管炎、急性咽炎、呼吸道感染等疾病^[15]。滇龙胆分布于云南、贵州、四川、湖南和广西等省区,主产于云南,是云南 10 个重要濒危药用植物之一,并已被列为国家重点保护野生药材物种(3 级)^[16]。国内滇龙胆药材人工驯化栽培刚起步,主产区在云南临沧,主要种植模式有单一种植及其与茶树(*Camellia sinensis*)、桉树(*Eucalyptus robusta*)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、核桃树(*Juglans regia*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等多种林药复合种植。滇龙胆元素含量研究鲜有报道^[17],不同种植模式对其矿质元素的影响尚不明确。本研究采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定了单一种植以及与茶树、旱冬瓜、杉木复合种植的滇龙胆及其生长土壤的矿质元素含量,结合单因素

方差分析、相关性分析和聚类分析对元素含量进行统计研究,为进一步探讨滇龙胆的质量评价和栽培技术提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 仪器与试剂

ICPE-9000 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(日本岛津公司),工作参数:高频发生器功率 1 200 W,载气流量 0.7 L/min,辅助气流量 0.6 L/min;Ethos One 微波消解仪(意大利 Milestone 公司);UPT-I-10L 超纯水处理器(成都优越科技有限公司);AR1140 分析天平(梅特勒-托利多仪器)。

B、Ca、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni 和 Zn 元素标准溶液质量浓度为 1 000 μg/mL,均购自国家标准物质中心,根据测定需要配制成不同浓度的混合标准溶液;硝酸(优级纯)、过氧化氢(分析纯)均购自广东西陇化工股份有限公司;高氯酸(有机纯)购自天津政成化学制品有限公司;氢氟酸(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 材料

滇龙胆样品采自云南临沧,分为滇龙胆单一种植、3 年生茶树+滇龙胆套种、3 年生旱冬瓜+滇龙胆套种、3 年生杉木+滇龙胆套种。每种模式选取 3 个采样点,每个样点随机采样 10 株。样品采集后依次用自来水、去离子水冲洗干净,分为根、茎、叶 3 个部位。60 ℃烘干后粉碎,过 0.15 mm 筛备用。土壤样品采自滇龙胆生长周围。

1.3 方法

准确称取滇龙胆样品粉末 0.5 g,加入 8 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢、1 mL 去离子水,在微波消解仪中进行样品消解。待消解样品冷却至室温,转移至 25 mL 容量瓶中,用去离子水定容,摇匀,得供试品溶液,样品一式 6 份,同时备空白溶液 1 份。采用 ICP-AES 法测定经消化处理的滇龙胆样品中矿质元素含量。

准确称取 0.1 g 土壤样品于聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 硝酸、2 mL 高氯酸、5 mL 氢氟酸、

5 mL盐酸,置于通风橱内的电热板上消化。冷却后转移至 25 mL 容量瓶,用去离子水定容,摇匀,得供试品溶液,样品平行 6 份,同时备空白溶液 1 份。采用 ICP-AES 法测定经消化处理的土壤中矿质元素含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式滇龙胆生长土壤中矿质元素含量分析

表 1 显示,与单一种植相比,滇龙胆与旱冬瓜、

杉木、茶树套种时,土壤 B、Ni、Zn 元素含量升高,Ca 和 Mn 元素含量降低。滇龙胆单一种植土壤矿质元素含量大小依次为:Fe>Ca>Mn>B>Cu>Zn>Ni>Mo;旱冬瓜+滇龙胆、杉木+滇龙胆、茶树+滇龙胆种植土壤矿质元素含量大小为 Fe>Ca>Mn>B>Zn>Ni≥Cu>Mo。种植模式导致土壤中某些矿质元素含量发生变化,茶树+滇龙胆种植模式下 B 含量最高,单一种植、旱冬瓜+滇龙胆、杉木+滇龙胆种植模式中差异均不显著;杉木+滇龙胆种植模式下 Fe 含量最低,其余 3 种植模式差异均不显著;4 种植模式 Ca、Zn、Ni、Cu 元素含量差异很大,变化范围分别为 194~481 μg/g,9.2~19.0 μg/g,5.8~12.0 μg/g,3.7~12.0 μg/g。

表 1 不同种植模式滇龙胆生长土壤矿质元素含量									μg/g
种植模式	B	Ca	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	
单一种植	20±1.0a	481±18d	9.4±0.20c	25 202±1 025b	144±6c	ND	5.8±0.1a	9.2±0.1a	
旱冬瓜+滇龙胆	22±2.0a	194±5a	12.0±0.04d	26 902±2 086b	142±10c	ND	12.0±0.1d	19.0±0.1d	
杉木+滇龙胆	21±0.7a	304±47c	3.7±0.30a	23 377±566a	60±2a	ND	8.7±0.4b	14.0±0.3b	
茶树+滇龙胆	27±0.2b	246±3b	6.2±0.20b	26 552±601b	94±2b	ND	11.0±0.3c	18.0±0.4c	

注:同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著;ND 表示未检出,下同。

2.2 不同种植模式滇龙胆中矿质元素含量分析

2.2.1 根部 表 2 显示,不同种植模式滇龙胆根中矿质元素含量具有差异。4 种植模式滇龙胆根中 Fe 元素含量差异显著,其中以单一种植滇龙胆根中含量最高,达 2 228 μg/g,旱冬瓜+滇龙胆复合种植时含量最低,为 543 μg/g;与 Fe 含量相似,不同种植模式滇龙胆根中 Mn 含量的差异也很大,含量变化范围为 77~167 μg/g。旱冬瓜+滇龙胆根部 Ca、Cu、Mn、Zn 元素含量均最高,分别为 3 265、115、167、42 μg/g。杉木+滇龙胆根部 Ni 元素含量最高,为 9.6 μg/g。

2.2.2 茎部 4 种植模式滇龙胆茎部 Ca、Cu、Fe、Mn 和 Ni 元素含量差异显著,单一种植时 Fe 含

量最高,达 623 μg/g,杉木+滇龙胆复合种植时含量最低,为 199 μg/g;Mn 元素含量变化范围为 135~321 μg/g。不同复合种植滇龙胆茎部 B、Ca、Fe、Ni 和 Zn 元素含量较单一种植均有不同程度降低。

2.2.3 叶部 4 种植模式滇龙胆叶部 Fe、Mn 元素含量差异大,变化范围分别为 408~893 μg/g 和 299~910 μg/g。茶树+滇龙胆种植模式下叶部 Cu、Zn 含量明显高于其他 3 种植模式,分别达 336、66 μg/g。旱冬瓜+滇龙胆叶部 B、Mn、Ni 元素含量均最高,分别为 29 μg/g、910 μg/g 和 5.9 μg/g。

表 2 显示,Mo 元素含量低于仪器检出限(0.15 μg/g),均未检出,不同种植模式的滇龙胆中矿质元

表 2 不同种植模式滇龙胆营养器官矿质元素含量										μg/g
种植模式	部位	B	Ca	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Zn	
单一种植	根	20±6.0Ba	2 955±177Ca	8±0.04Aa	2 228±7Dc	137±3Ca	ND	5.0±0.30Ac	36±2.0Ba	
	茎	18±0.3Ca	7 310±71Db	15±0.07Cc	623±7Da	231±5Bb	ND	3.5±0.02Da	49±0.4Bb	
	叶	19±1.0Ba	8 181±71Cc	9±0.20Ab	893±4Db	595±4Cc	ND	4.3±0.20Ab	49±0.5Bb	
旱冬瓜+滇龙胆	根	10±0.6Aa	3 265±67Da	115±2.00Cc	543±18Ab	167±3Da	ND	7.4±0.10Bc	42±0.5Cc	
	茎	11±0.4Aa	5 788±71Cb	21±0.20Db	272±13Ba	321±10Db	ND	2.4±0.04Ba	39±0.2Aa	
	叶	29±0.5Cb	7 914±389Cc	11±0.40Aa	659±14Cc	910±28Dc	ND	5.9±0.40Cb	41±2.0Ab	
杉木+滇龙胆	根	12±0.3Aa	2 294±60Aa	9±0.10Ab	1 104±35Cc	77±4Aa	ND	9.6±0.40Dc	34±0.8Aa	
	茎	12±0.0Aa	3 579±549Ab	8±1.50Aa	199±1Aa	135±16Ab	ND	1.5±0.40Aa	37±7.0Aa	
	叶	16±1.0Ab	4 887±176Ac	16±1.10Ac	408±32Ab	299±9Ac	ND	4.9±0.10Bb	42±0.8Ab	
茶树+滇龙胆	根	11±2.0Aa	2 508±71Ba	47±2.00Bb	1 008±4Bc	116±1Ba	ND	8.2±0.20Cc	34±0.5Aa	
	茎	14±1.0Bb	4 788±7Bb	13±0.00Ba	373±6Ca	242±4Cb	ND	3.1±0.06Ca	37±0.4Aa	
	叶	16±1.0Ac	6 148±247Bc	336±16.00Bc	455±36Bb	511±48Bc	ND	4.4±0.00Ab	66±2.0Cb	

注:同列中小写字母为同一模式不同部位比较,大写字母为种植模式间同一部位比较,不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

素分布具有差异。Fe、Mn 元素含量差异变化均很大,表明不同种植模式滇龙胆对 Fe、Mn 的富集能力差异较大。同一种种植模式滇龙胆根、茎、叶部 Ca、Cu、Fe、Mn、Ni 元素含量在 0.05 水平均差异显著。Ca、Mn 元素含量均表现为叶>茎>根,Ni 元素含量与之不同,表现为根>叶>茎。营养器官矿质元素含量与中药的药用价值密不可分^[18],但矿质元素含量的高低并不能作为评价药材质量的唯一标准^[19],其药理活性的高低需进一步临床研究。

2.3 不同种植模式滇龙胆矿质元素生物富集能力比较分析

生物富集系数 (bioconcentration factor, 简称为 BCF)是指植物体内某种元素含量与其产地土壤中

同种元素含量的比值,反映植物对土壤元素的富集能力^[20]。表 3 显示,各种种植模式下的滇龙胆对 Ca、Zn 元素的富集能力较强。4 种种种植模式下的 Cu 元素 BCF 差异最大,茶树+滇龙胆种植模式下的叶片对 Cu 的 BCF 最大,其次是早冬瓜+滇龙胆种植模式下的根,但 BCF 远小于茶树+滇龙胆种植模式下的叶片,单一种植的滇龙胆根对 Cu 的 BCF 最小。各种种植模式的样品对 Fe 的 BCF 小于 1,变化范围是 0.01~0.09,表明 4 种种种植模式滇龙胆中 Fe 的含量明显低于土壤环境中 Fe 的含量。综合分析,滇龙胆对矿质元素的富集能力不仅与矿质元素的种类有关,与种植模式也密切相关。

表 3 滇龙胆中矿质元素含量与其产地土壤中矿质元素含量的比值 (BCF)

种植模式	部位	B	Ca	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
单一种植	根	1.00	6.1	0.8	0.09	0.95	0.86	3.9
	茎	0.90	15	1.6	0.02	1.6	0.60	5.3
	叶	0.95	17	1.0	0.04	4.1	0.74	5.3
早冬瓜+滇龙胆	根	0.45	17	9.6	0.02	1.2	0.62	2.2
	茎	0.50	30	1.8	0.01	2.3	0.20	2.1
	叶	1.30	41	0.9	0.02	6.4	0.49	2.2
杉木+滇龙胆	根	0.57	7.6	2.4	0.05	1.3	1.10	2.4
	茎	0.57	12	2.1	0.01	2.3	0.17	2.6
	叶	0.76	16	4.3	0.02	4.9	0.56	3.0
茶树+滇龙胆	根	0.41	10	7.6	0.04	1.2	0.75	1.9
	茎	0.52	19	2.1	0.01	2.6	0.28	2.1
	叶	0.59	25	54	0.02	5.4	0.40	3.7

2.4 不同种植模式滇龙胆不同部位样品聚类分析

图 1 为不同部位滇龙胆样品聚类树状图,聚类距离计算采用欧氏距离平方法,聚类方法采用 ward 法。临界值等于 20 时,滇龙胆样品分为两大类:不同种植模式滇龙胆根聚为一类,这一类样品所含元素含量大多低于滇龙胆茎、叶中相应元素含量,其中单一种植滇龙胆根与其他复合种植模式根样品明显

分开是由于其 Fe 元素含量较高;茎、叶样品聚为一类,茶树+滇龙胆种植模式的叶片 Cu、Zn 元素含量较高,能够明显区分,早冬瓜+滇龙胆种植模式下叶片 B 元素含量高,能够明显区分。同一种种植模式滇龙胆不同营养器官样品未聚为一类,表明滇龙胆不同营养器官对元素的选择吸收性能不同,元素在滇龙胆样品体内存在分布差异。不同种植模式滇龙胆根、茎、叶没有分别聚为一类,表明复合种植可能影响滇龙胆对矿质元素的吸收。

2.5 种植土壤与各种种植模式滇龙胆矿质元素含量的相关性分析

4 种种种植模式滇龙胆中矿质元素含量与土壤的相关性分析见表 4。滇龙胆单一种植及杉木+滇龙胆、早冬瓜+滇龙胆复合种植时,其不同营养器官与土壤中部分元素具有一定相关性,表明土壤中的这些矿质元素含量会影响滇龙胆对相应矿质元素的吸收。如杉木+滇龙胆种植模式下的根、茎、叶与土壤中 Ca 元素含量呈极显著相关关系,相关系数分别为 -0.973、0.924 和 -0.968;单一种植的滇龙胆茎

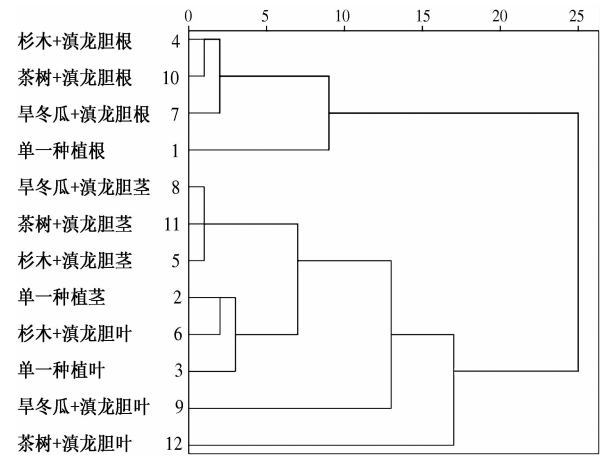


图 1 滇龙胆不同部位样品聚类分析结果

与土壤中 Mn 元素含量呈极显著正相关,相关系数为 0.951;单一种植的滇龙胆根与土壤中 Ca 元素含量呈极显著正相关,相关系数为 0.909,其根与土壤中 B、Mn 元素含量呈显著正相关,相关系数分别为 0.871 和 0.872;旱冬瓜 + 滇龙胆种植模式下根与土壤中 B、Fe 元素均呈显著正相关,相关系数分别为 0.842 和 0.893。其余各元素在滇龙胆和栽培土壤间相关性不显著。

表 4 滇龙胆不同营养器官与土壤中矿质元素含量的相关性分析

种植模式	部位	B	Ca	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
单一种植	根	0.871 *	0.909 **	-0.188	0.155	0.872 *	0.645	0.795
	茎	-0.516	0.667	0.597	0.660	0.951 **	-0.392	0.811
	叶	0.732	0.467	-0.196	0.576	0.661	0.636	-0.227
旱冬瓜 + 滇龙胆	根	0.842 *	0.271	0.303	0.893 *	0.679	-0.274	0.015
	茎	-0.810	-0.149	-0.542	-0.168	-0.511	-0.753	0.052
	叶	-0.600	-0.451	0.363	-0.200	-0.481	0.076	-0.095
杉木 + 滇龙胆	根	-0.677	-0.973 **	-0.459	-0.105	-0.399	0.531	-0.147
	茎	-0.571	0.924 **	0.602	0.361	0.722	-0.687	-0.309
	叶	-0.560	-0.968 **	-0.630	-0.553	-0.709	-0.472	0.079
茶树 + 滇龙胆	根	0.085	-0.590	-0.349	0.495	0.695	-0.209	-0.792
	茎	0.219	0.003	0.438	-0.214	0.211	0.617	0.153
	叶	-0.183	-0.369	-0.384	-0.145	-0.167	-0.342	-0.535

注:**表示在 0.01 水平上相关性显著(双尾检测);*表示在 0.05 水平上相关性显著(双尾检测)。

3 结论与讨论

不同种植模式滇龙胆含有丰富的 Ca、Fe、Mn 等多种矿质元素,且存在分布差异。复合种植改变滇龙胆吸收矿质元素能力的作用效果可能是增加也可能是减少,这取决于套作的植物种类。根部为滇龙胆的主要药用部位,滇龙胆与旱冬瓜套种时,根部对 Ca、Cu、Mn、Zn 的吸收能力提高;与杉木、茶树套种时,根部对 B、Ca、Fe、Mn、Zn 的吸收能力均下降。Gunes 等^[21]研究发现,小麦与鹰嘴豆间作,小麦枝中 P、K、Fe、Zn、Mn 含量增加;与小扁豆复合种植,种子中 N、P、K、Fe 含量增加。Gove 等^[22]研究发现,遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)与大麦(*Hordeum vulgare*)间作时大麦对 Zn 的吸收显著降低。

滇龙胆对矿质元素的吸收存在主动吸收的过程,元素含量与土壤中部分元素具有一定相关性。土壤是植物吸收矿质元素的主要来源,复合种植通过影响植物根系的分泌物和根围微生物的种群分布,最终影响植物对重金属的吸收能力。如白羽扇豆和小麦间作时,白羽扇豆根系分泌的有机酸显著升高,有效促进小麦对 P 的吸收^[23]。

土壤是植物吸收矿质元素的主要来源,种植模式改变土壤理化性状,其与滇龙胆自身的生物学特性共同影响滇龙胆体内元素的分布特征。矿质营养元素的丰缺影响植物生长发育,进而影响代谢途径^[24],导致药材品质发生变化,如何结合药理活性的高低选择合理的种植模式,实现种植地的可持续

利用,需进一步深入研究。

参考文献:

[1] Zuo Y, Zhang F. Iron and zinc biofortification strategies in dicot plants by intercropping with gramineous species: A review [M]. Agronomy for Sustainable Development, 2009;571-582.

[2] 王吉秀,祖艳群,李元,等. 玉米和不同蔬菜间套模式对重金属 Pb,Cu,Cd 累积的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2012,30(11):2168-2173.

[3] Ehrmann J, Ritz K. Plant: Soil interactions in temperate multi-cropping production systems[J]. Plant Soil, 2014, 376:1-29.

[4] Sun D L,Sun Y B. Evaluation of the soil heavy metal pollution around the lead-zinc plants [J]. Advanced Materials Research,2014,926:4238-4241.

[5] 高微微,赵杨景,王玉萍,等. 我国药用植物栽培地的可持续利用研究[J]. 中国中药杂志,2006,31(20):1665-1669.

[6] 李远菊,张霁,王元忠,等. 药用植物复合种植研究进展[J]. 世界科学技术:中医药现代化,2013,15(9):1941-1947.

[7] Zhang J,Zhang X,Wang Y Z,*et al.* Determination of trace elements in *Coptis teeta* and soil by ICP-AES [J]. Asian Journal of Chemistry,2011,23(9):4225-4226.

[8] Cindrić I J,Zeiner M,Krpetić M,*et al.* ICP-AES determination of minor and major elements in Cornelian cherry (*Cornus mas* L.) after microwave assisted digestion[J]. Microchemical Journal,2012,105:72-76.

[9] Peterson C L,Kaufmann G S,Vandello C,*et al.* Parent

- genotype and environmental factors influence introduction success of the critically endangered Savannas Mint (*Dicerandra immaculate* var. *savannarum*) [J]. PLoS One, 2013, 8: e61429.
- [10] Sun J B, Gao Y G, Zang P, et al. Mineral elements in root of wild *Saposhnikovia divaricata* and its rhizosphere soil [J]. Biological Trace Element Research, 2013, 153: 363-370.
- [11] 杜友, 盛晋华, 崔旭盛, 等. 不同产地管花肉苁蓉矿质元素分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32 (10): 2824-2827.
- [12] Ågren G I, Weih M. Plant stoichiometry at different scales: Element concentration patterns reflect environment more than genotype [J]. New Phytologist, 2012, 194 (4): 944-952.
- [13] Stock W D, Verboom G A. Phylogenetic ecology of foliar N and P concentrations and N: P ratios across Mediterranean-type ecosystems [J]. Global Ecology and Biogeography, 2012, 21 (12): 1147-1156.
- [14] 国家药典委员会. 中国药典 [M]. 北京: 中国医药出版社, 2010: 89.
- [15] Yang J L, Liu L L, Shi Y P. Phytochemicals and biological activities of *Gentiana* species [J]. Natural Product Communications, 2010, 5 (4): 649-664.
- [16] 李智敏, 刘莉, 李晚谊, 等. 滇龙胆的药用资源研究与开发进展 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2009, 31 (S1): 485-487.
- [17] Zhang J Y, Yuan T J, Wang Y Z, et al. Determination of mineral elements in *Gentiana rigescens* from different zones of Yunnan, China [J]. Biological Trace Element Research, 2012, 147: 329-333.
- [18] Han C C, Li J, Hui Q S. Determination of trace elements in Jinqi, a traditional Chinese medicine [J]. Biological Trace Element Research, 2008, 122: 122-126.
- [19] Langdon-Jones E E, Pope S J A. The coordination chemistry of substituted anthraquinones: Developments and applications [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2014, 269: 32-53.
- [20] Wiek A, Wang Y, Zhang J, et al. Bioconcentration potential and contamination with mercury of pantropical mushroom *Macrocybe gigantean* [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2014, 49 (11): 811-814.
- [21] Gunes A, Inal A, Adak M S, et al. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by mixed cropping and soil moisture [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 78: 83-96.
- [22] Gove B, Hutchinson J J, Young S D. Uptake of metals by plants sharing a rhizosphere with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, 4 (4): 267-281.
- [23] Kamh M, Horst W J, Amer F, et al. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops [J]. Plant and Soil, 1999, 211 (1): 19-27.
- [24] 刘大会, 郭兰萍, 黄路琦, 等. 矿质营养对药用植物黄酮类成分合成的影响 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35 (18): 2367-2371.