

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019012301

母茂君, 周雪芹, 郭冬琴, 等. 太白贝母种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(9): 1966-1972.

MU Maojun, ZHOU Xueqin, GUO Dongqin, et al. Effect of growth years to the soil enzyme activities and heavy metal residue of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(9): 1966-1972.

太白贝母种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响*

母茂君^{1,2} 周雪芹¹ 郭冬琴¹ 王 骞^{1,2} 杨 敏² 张 华¹ 周 浓^{1**}

(1. 重庆三峡学院 生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程实验室, 重庆, 404120;

2. 大理大学 药学与化学学院, 大理, 671000)

摘 要 通过实地调查与采集重庆市巫溪县 8 份不同生长年限太白贝母根际区土壤, 研究太白贝母根际区土壤酶活性、重金属含量的变化规律, 揭示生长年限对其根际土壤中酶活性及重金属含量的影响情况。结果表明, 不同生长年限太白贝母根际土壤酶活性、重金属元素含量具有显著性差异 ($P < 0.05$), 呈现出不同的变化规律并具有一定的相关性。整体上, 太白贝母栽培品根际土壤蛋白酶、脲酶、过氧化氢酶随着生长年限的增加呈先下降后上升的趋势, 磷酸酶、蔗糖酶随着生长年限的增加呈先上升后下降的趋势, 野生品根际土壤酶活性与其变化趋势不一致。随着生长年限的增加, 太白贝母栽培品根际土壤 Cd、Hg、Pb、Zn 和 Ni 含量先升高后下降, As 和 Cu 含量变化不大。野生品根际土壤重金属含量与其变化规律一致。Cd、Hg、As、Cu、Ni 含量均远低于国家农用地土壤风险筛选值, Pb 含量除 S7(中贝)外均低于国家农用地土壤风险筛选值, Zn 含量均远高于国家农用地土壤风险筛选值, 土壤污染属轻度污染, 应采取安全措施, 以保证太白贝母的人药安全性。相关分析得知, 根际土壤酶活性与重金属含量之间存在相关关系, 既存在协同作用, 又具有拮抗作用。

关键词 太白贝母, 土壤, 重金属, 酶活性, 生长年限, 污染评价。

Effect of growth years to the soil enzyme activities and heavy metal residue of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li

MU Maojun^{1,2} ZHOU Xueqin¹ GUO Dongqin¹ WANG Qian^{1,2}
YANG Min² ZHANG Hua¹ ZHOU Nong^{1**}

(1. College of Food and Biological Engineering, The Chongqing Engineering Laboratory for Green Cultivation and Deep Processing of the Three Gorges Reservoir Area's Medicinal Herbs, Chongqing Three Gorges University, Chongqing, 404120, China; 2. College of Pharmacy and Chemistry, Dali University, Dali, 671000, China)

Abstract: In order to reveal the effects of enzyme activity and heavy metal contents in the rhizosphere soil of *Fritillaria taipaiensis*, 8 rhizospheric soils of *Fritillaria taipaiensis* were collected periodically throughout the growth years of *Fritillaria taipaiensis*. The soil enzyme activities and the variation rule of heavy metal content of rhizospheric soil for *Fritillaria taipaiensis* were studied. The results showed a significant difference ($P < 0.05$), as well as different variation rules and a certain relative correlation between the rhizospheric soil enzyme activities and the heavy metal content of

2019年1月23日收稿(Received: January 23, 2019).

* 重庆市基础与前沿研究计划(CSTC2016jcyjA0555, CSTC2013jcyjA10120), 教育部“春晖计划”(Z2015150)和重庆市万州区科技人才专项资金(2015016)资助。

Supported by the Research Project of Foundation and Frontier in Chongqing(CSTC2016jcyjA0555, CSTC2013jcyjA10120), Chunhui of Ministry of Education Project(Z2015150) and Special Funds for Science and Technology Talents in Wanzhou District of Chongqing(2015016).

** 通讯联系人, Tel: 023-58576130, E-mail: erhaizn@126.com

Corresponding author, Tel: 023-58576130, E-mail: erhaizn@126.com

Fritillaria taipaiensis that was collected from the different growth years. Overall, the activity of soil protease, urease and catalase in the cultivated *Fritillaria taipaiensis* variety decreased first and then increased, while phosphatase and saccharase increased first and then decreased with the increase of years. However, the soil enzyme activities of the wild variety did not show the same trend with the cultivated variety. The content of Cd, Hg, Pb, Zn and Ni in cultivated *Fritillaria taipaiensis* variety increased first and then decreased, while As and Cu changed little with the increase of years. The heavy metal content of the wild variety showed the same variation trend with the cultivated variety. The content of Cd, Hg, As, Cu and Ni were much lower than the national soil use risk screening values. The content of Pb was lower than the national soil use risk screening values except S7 and the Zn content was much higher than the national agricultural land soil risk. Screening values showed a mild pollution level therefore safety measures should be taken to ensure the drug safety of *Fritillaria taipaiensis*. The correlation analysis showed there were the correlation between the soil enzyme activities and the heavy metal content performing the synergism and antagonism.

Keywords: *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li, soil, heavy metal, enzyme activities, growth years, pollution evaluation.

太白贝母(*Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li)为百合科贝母属植物,以干燥鳞茎入药,为2015年版《中国药典》(一部)川贝母项下收载品种^[1].川贝母是常用的润肺止咳化痰中药材之一,民间在日常食补或疾病康复中常以川贝杏仁鸭、川贝雪梨猪肺汤、川贝粥等方式食用,与百姓疾病密切相关^[2-4].国际传统医药日益受到人们的青睐,中药材的安全性也成为老百姓关注的焦点,中药材的重金属含量超标问题成为中药国际化过程的一大壁垒^[5-6].中药中重金属含量主要来源于其栽培土壤中的重金属,可通过药用植物根系吸收进入食物链到达人体,严重威胁人类健康^[4,7].

课题组前期的研究表明,太白贝母鳞茎中砷、汞、镉的含量呈随着生长年限(根据药材性状和大小^[8])增加而增加的趋势^[4].同时,同属植物湖北贝母药材中砷、铅、铬含量与土壤中含量显著相关^[9],浙贝母栽培土壤中镉富集程度高并超过国家二级土壤标准^[10],但随着生长年限的增加,浙贝母根际土壤的脲酶、过氧化氢酶显著降低,蔗糖酶、多酚氧化酶呈现增加趋势^[11].而土壤酶活性的大小可较灵敏地反映土壤中生化反应的方向和强度,重金属在生态系统中具有长期的毒性作用且对土壤酶催化过程有着调节作用(促进、抑制)^[12].

本文着重对重庆市巫溪县不同生长年限太白贝母根际土壤的重金属含量和土壤酶活性进行了调查研究,旨在探讨太白贝母不同生长年限条件下根际土壤重金属累积与土壤酶活性之间的相关性,了解栽培太白贝母对土壤环境的效应、防控产地土壤重金属污染,以期为提高巫溪县太白贝母的产量和品质,具有重要的意义.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集

1.1.1 研究区域土壤概况

太白贝母栽培品土壤样品采自重庆市巫溪县兰英乡,本试验采样区域位于31°23'56.11"/109°50'29.93"—31°24'59.01"/109°55'18.00",海拔2274—2290 m,属亚热带暖湿季风气候,山地年平均气温小于5℃,无霜期279 d,年降水量在10—1950 mm,土壤类型为山地黄棕壤.

太白贝母野生品土壤样品采自重庆市巫溪县文峰镇红池坝风景区,本试验采样区域位于31°32'42.87"/109°40'43.13"—31°35'26.57"/109°00'11.96",海拔2469—2507 m^[13],属典型的立体高寒山区气候,年平均气温7.2℃,无霜期135 d,年均降水量1100—1300 mm,土壤类型为山地黄棕壤.栽培与野生采样区均属于大巴山山脉(巫山山脉),是重庆市主要林业土壤类型,成土母质以页岩和板岩等为主,两地直线距离约70 km.

1.1.2 样品的采集与分类

2013年6月至7月根据太白贝母的自然分布区和栽培现状,人工栽培的不同生长年限施肥量相同,

均为复合肥(N-P₂O₅-K₂O,15:15:15)225 kg·hm⁻²,野生太白贝母未人为施肥.待太白贝母植株枯萎后收集根际土,采用多点混合法收集与处理太白贝母收获期的根际土壤,轻轻地去掉枯枝落叶层,用小木铲轻轻挖掉表面的浮土,运用抖根法收集根际土壤^[14],每个土壤样本平行采集3份,并记录采样信息(表1),太白贝母栽培品按照实际生长年限进行分类,太白贝母野生品按照药材性状、植株形态进行分类为大贝(5年以上)、中贝(3—4年)、松贝(1—2年)^[8],土壤样品风干处理,备用.

表1 不同生长年限太白贝母采样点的基本情况

Table 1 Basic sampling point information of *Fritillaria taipaiensis* with different growth years

No.	生长年限 Growth years	样品来源 Sample source	生长方式 Growth mode
S1	1年生	重庆市巫溪县兰英乡黄草坪	栽培
S2	2年生	重庆市巫溪县兰英乡黄草坪	栽培
S3	3年生	重庆市巫溪县兰英乡黄草坪	栽培
S4	4年生	重庆市巫溪县兰英乡黄草坪	栽培
S5	5年生	重庆市巫溪县兰英乡黄草坪	栽培
S6	大贝	重庆市巫溪县文峰镇红池坝风景区	野生
S7	中贝	重庆市巫溪县文峰镇红池坝风景区	野生
S8	松贝	重庆市巫溪县文峰镇红池坝风景区	野生

1.2 实验方法

1.2.1 太白贝母根际土壤土壤酶活性的测定

各土壤酶活性的测定主要参照关松荫^[15]的方法并稍加改进,用离心(5000 r·min⁻¹,5 min)替代过滤.蔗糖酶活性以 mg glucose·g⁻¹(37 °C,24 h)表示,脲酶活性以 mg NH₃-N·g⁻¹(37 °C,24 h)表示,磷酸酶活性以 mg phenol·g⁻¹(37 °C,24 h)表示,蛋白酶活性以烘干土中 μg NH₂·g⁻¹(50 °C,2 h)表示,过氧化氢酶活性以 mg H₂O₂·g⁻¹(37 °C,20 min)表示.

1.2.2 太白贝母根际土壤重金属元素含量的分析

重金属元素的含量测定参照土壤环境质量标准(GB 15618—2018)4.1、5.1^[16]和2015年版《中国药典》四部附录IXB的规定执行^[17],Cd、Cu、Pb、Zn、Ni、Cr元素测定采用原子吸收光谱法测定,Hg、As元素测定采用原子荧光光谱法测定.

1.2.3 太白贝母根际土壤pH的测定

根际土壤pH值测定参照鲍士旦^[14]的方法,土液比1:5电位法测定,平行3次.

1.2.4 太白贝母栽培基地土壤污染现状评价方法与评价标准

参照中华人民共和国环境保护行业标准《土壤环境监测技术规范(HJ/T166—2004)》,采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数法^[18]进行评价.根据《中药材生产质量管理规范(GAP)》规定,中药材产地的土壤应符合《土壤环境质量标准(GB15618—2018)试行》的标准.

表2 土壤环境质量标准(GB 15618—2018)

Table 2 Environmental quality standard for soils (GB15618—2018)

污染物项目 Contaminant project	重金属含量(≤) Heavy metal content/(mg·kg ⁻¹)	
	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5
Cd	0.3	0.3
Hg	1.3	1.8
As	40	40
Cu	50	50
Pb	70	90
Zn	200	200
Ni	60	70
Cr	150	150

1.3 数据处理与分析

本实验数据均采用 Excel 2003 和 SPSS18.0 软件进行统计分析.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 不同生长年限太白贝母根际土壤酶活性

土壤酶活性是一种最稳定最敏感地反映出土壤生物性能变化的指标,是测定土壤污染和监测由污染土壤的各种变化的一种生物学有效方法^[19].由表 3 可知,不同生长年限太白贝母根际土壤蛋白酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性达显著性差异($P < 0.05$),整体上野生品的土壤酶活性远大于栽培品并高于平均值.太白贝母栽培品根际土壤蛋白酶、脲酶、过氧化氢酶随着生长年限的增加呈先下降后上升的趋势,磷酸酶、蔗糖酶随着生长年限的递增呈先上升后下降的趋势,其中以生长年限为 3 年的为临界值.而太白贝母野生品根际土壤蛋白酶、磷酸酶随着生长年限的增加呈现下降的趋势,脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶随着生长年限的递增呈现上升的趋势,因此,随着生长年限的增加可能导致土壤结构形成、养分转化供应等生物化学过程紊乱,从而影响土壤养分的有效性,不利于太白贝母生长发育,使生物碱含量显著降低^[20].

表 3 不同生长年限太白贝母根际土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities of rhizospheric soil of *Fritillaria taipaiensis* collected from different growth years

No.	蛋白酶 Protease/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	脲酶 Urease/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	磷酸酶 Phosphatase/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	过氧化氢酶 Catalase/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	蔗糖酶 Saccharase/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
S1	21.412c	19.185c	23.000b	0.451e	9.214f
S2	7.078cd	2.519g	23.494b	0.408f	13.917d
S3	2.349d	9.185e	30.786a	0.319g	14.009d
S4	17.201cd	9.741e	17.358d	0.449e	14.681c
S5	14.319cd	11.963d	11.515g	0.488d	10.980e
S6	56.362b	32.704a	21.925c	0.730a	30.956a
S7	58.949b	31.593b	12.715f	0.626b	24.327b
S8	75.130a	5.296f	15.571e	0.543c	14.660c
平均值 Average	31.600	15.273	19.546	0.502	16.593

注:同列不同小写字母分别表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同.

Note: The column with different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$), the below is the same.

2.2 不同生长年限太白贝母根际土壤中重金属含量的分析

方差分析表明,Cd、Hg、As、Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 等 8 种重金属元素在不同生长年限太白贝母根际土壤除 Cr 含量低于检测限外均有检出,Cu、Pb、Zn、Ni 含量存在显著性差异($P < 0.05$),各重金属元素含量均值高低排列顺序为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$,其中 Pb、Zn、Ni 等元素的含量相对较高,而以 Zn 元素含量为最高,结果见表 4 所示.太白贝母栽培品根际土壤 Cd、Hg、Pb、Zn、Ni 含量随着生长年限的递增呈先升高后下降的趋势,As 和 Cu 含量随着生长年限的递增呈下降的趋势并无显著性差异.太白贝母野生品根际土壤 Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Ni 含量随着生长年限的递增呈先升高后下降的趋势,As 含量随着生长年限的递增呈下降的趋势并无显著性差异.整体上,太白贝母野生品根际土壤 Pb 含量高于栽培品、Cu、Zn、Ni 含量低于栽培品,而 Cd、Hg、As 含量相差不大.进一步表明,不同年限太白贝母根际土壤间除土壤酶有明显差异外,其重金属元素的含量也有很大的差异.

根据中华人民共和国《土壤环境质量标准(GB15618—2018)试行》的标准要求的各项污染物的浓度限值,巫溪县太白贝母栽培基地及野生分布区的土壤中 Zn 元素含量均高于土壤环境质量标准的限量值,其余元素含量均远低于土壤环境质量标准的限量值,符合中药材 GAP 产地的土壤质量要求与规定.以三峡库区的区域土壤重金属背景值为标准($\text{Cd} \leq 0.134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Hg} \leq 0.046 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{As} \leq 5.835 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cu} \leq 25.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} \leq 23.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Zn} \leq 69.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Ni} \leq 29.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[21],

As 含量均远低于其背景值, Pb、Zn 含量均高于其背景值, 其余元素含量均有不同程度的高于其背景值, 可能与巫溪县等周边地区土壤中 Cd、Hg、Cu、Pb、Zn、Ni 等富集程度偏高有关^[21-23], 有待进一步深入基地跟踪调查研究。

表 4 根际土壤中重金属含量的比较 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 The comparison of the heavy metal residue in the rhizospheric soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

No.	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Ni	总量 Total	pH
S1	0.176c	0.038e	0.618a	34.983a	57.346f	304.848c	50.162c	448.171c	5.04e
S2	0.267a	0.065c	0.587b	32.875d	85.313a	337.500b	54.500a	511.106b	5.88a
S3	0.221b	0.072b	0.562c	33.549b	47.269h	439.012a	44.151e	564.839a	5.51c
S4	0.221b	0.031f	0.605ab	33.242c	64.921d	296.176d	52.487b	447.683d	5.64b
S5	0.130d	0.047d	0.559c	32.180e	47.551g	269.933f	47.363d	397.762f	5.82a
S6	0.176c	0.049d	0.500e	21.815g	68.068c	250.811g	23.973g	365.393g	5.14d
S7	0.267a	0.098a	0.526d	24.113f	76.668b	285.821e	30.400f	417.892e	5.22d
S8	0.130d	0.035e	0.535d	12.974h	59.444e	244.511h	23.890h	341.518h	4.86f
平均值 Average	0.198	0.054	0.562	28.216	63.322	303.576	40.866	436.797	5.39

2.3 不同生长年限太白贝母根际土壤中重金属污染评价

以中华人民共和国《土壤环境质量标准 (GB15618—2018) 试行》为其评价标准, 采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法分析太白贝母土壤重金属污染状况, 结果见表 5。结果表明, 不同生长年限太白贝母根际土壤中 Hg、As、Cu 单项污染指数均 ≤ 0.7 , Cd、Ni 单项污染指数均 ≤ 1 , Pb 单项污染指数除 S7 > 1 外其余均 < 1 , Zn 单项污染指数均 > 1 , 内梅罗综合污染指数 $S3 > S2 > S1 > S4 > S7 > S5 > S6 > S8$, 所以, 通过单项污染指数和内梅罗污染指数评价结果可以看出, 研究区域土壤主要受到 Zn 的轻度污染。

表 5 土壤重金属污染评价

Table 5 Pollution assessment of heavy metal in soil

No.	P_i							$P_{\text{综合}}$	污染等级评价 Pollution level evaluation
	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Ni		
S1	0.586	0.029	0.015	0.700	0.819	1.524	0.836	1.170	轻度污染
S2	0.890	0.036	0.015	0.657	0.948	1.688	0.779	1.297	轻度污染
S3	0.736	0.040	0.014	0.671	0.525	2.195	0.631	1.626	轻度污染
S4	0.738	0.017	0.015	0.665	0.721	1.481	0.750	1.137	轻度污染
S5	0.434	0.026	0.014	0.644	0.528	1.350	0.677	1.024	轻度污染
S6	0.585	0.038	0.013	0.436	0.972	1.254	0.400	0.962	安全等级
S7	0.888	0.075	0.013	0.482	1.095	1.429	0.507	1.108	轻度污染
S8	0.434	0.027	0.013	0.259	0.849	1.223	0.398	0.923	安全等级

2.4 不同生长年限太白贝母根际土壤酶、重金属之间的相关性分析

运用 SPSS 18.0 软件对不同生长年限 8 份太白贝母根际土壤中的 5 种土壤酶活性与 7 种重金属元素含量进行相关分析, 结果见表 6。从表 6 可以看出, 根际土壤中土壤酶活性之间存在一定的相关性, 蛋白酶活性与过氧化氢酶活性有显著正相关 ($r=0.802, P<0.05$), 脲酶活性与过氧化氢酶、蔗糖酶活性有显著正相关 ($r=0.772, 0.758, P<0.05$), 过氧化氢酶活性与蔗糖酶活性有显著正相关 ($r=0.822, P<0.05$)。根际土壤中重金属元素之间也存在一定的相关性, Cu 含量与 As 含量有显著正相关 ($r=0.749, P<0.05$), Ni 含量与 As、Cu 含量有极显著正相关 ($r=0.890, 0.913, P<0.01$)。

同时, 根际土壤中土壤酶活性与重金属元素含量间也存在一定相关性, 蛋白酶活性与 Cu、Ni 含量有极显著负相关 ($r=-0.938, -0.911, P<0.01$), 磷酸酶活性与 Zn 含量有显著正相关 ($r=0.773, P<0.05$), 过氧化氢酶与 As、Zn、Ni 含量有显著负相关 ($r=-0.738, -0.776, -0.770, P<0.05$); 蔗糖酶活性与 As、Ni 含量有显著负相关 ($r=-0.800, -0.709, P<0.05$)。进一步表明太白贝母根际土壤中重金属积累对土壤酶活

性的具有抑制或促进的调节作用,与高秀丽等^[24]对华北平原某铅冶炼厂附近农田 33 个土壤样品中重金属积累对土壤酶活性的影响结果一致。

表 6 不同生长年限太白贝母根际土壤酶、重金属之间的相关性分析

Table 6 The correlation analysis between the soil enzyme activities and the heavy metal residue of rhizospheric soil for *Fritillaria taipaiensis* with different growth years

相关系数 Correlation coefficient	蛋白酶 Protease	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Saccharase	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Ni
蛋白酶 Protease	-											
脲酶 Urease	0.465	-										
磷酸酶 Phosphatase	-0.475	-0.187	-									
过氧化氢酶 Catalase	0.802 *	0.772 *	-0.489	-								
蔗糖酶 Saccharase	0.585	0.758 *	-0.081	0.822 *	-							
Cd	-0.280	0.090	0.283	-0.187	0.214	-						
Hg	0.015	0.357	0.062	0.061	0.367	0.679	-					
As	-0.696	-0.525	0.233	-0.738 *	-0.800 *	0.160	-0.363	-				
Cu	-0.938 **	-0.211	0.375	-0.662	-0.507	0.349	0.030	0.749 *	-			
Pb	0.215	0.164	-0.092	0.322	0.427	0.681	0.353	-0.087	-0.143	-		
Zn	-0.704	-0.342	0.773 *	-0.776 *	-0.322	0.484	0.388	0.349	0.595	-0.202	-	
Ni	-0.911 **	-0.524	0.250	-0.770 *	-0.709 *	0.298	-0.151	0.890 **	0.913 **	-0.039	0.483	-

注: ** 为 $P < 0.01$ 水平相关极显著, * 为 $P < 0.05$ 水平相关显著。

Note: ** means significant difference at 0.01 level ($P < 0.01$), * means significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$).

3 结论 (Conclusion)

(1) 不同生长年限太白贝母根际土壤中 5 种酶活性的分布呈现出不同的变化规律.整体上来说,太白贝母栽培品根际土壤蛋白酶、脲酶、过氧化氢酶随着生长年限的增加呈先下降后上升的趋势,磷酸酶、蔗糖酶随着生长年限的增加呈先上升后下降的趋势,其中以生长年限为 3 年的为临界值.而太白贝母野生品根际土壤蛋白酶随着生长年限的增加呈现下降的趋势,脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶随着生长年限的递增呈上升的趋势,磷酸酶随着生长年限的递增呈先下降后上升的趋势。

(2) 不同生长年限太白贝母根际土壤中的重金属元素含量具有较大差异,Zn 含量高于国家土壤环境质量的限量值,其余金属元素含量均远低于国家土壤环境质量的限量值.随着生长年限的递增,太白贝母栽培品根际土壤 Cd、Hg、Pb、Zn 和 Ni 含量呈先升高后下降的趋势,As 和 Cu 含量呈下降的趋势,野生品与其变化规律一致。

(3) 以国家土壤环境质量标准作为评价标准的评价,不同生长年限太白贝母根际土壤中元素 Zn 的单项污染指数均 > 1 ,综合污染指数除 S6、S8 外其余地区均 > 1 ,土壤污染等级属轻度污染,太白贝母生长土壤开始受到污染.从单因子污染指数可知,主要是 Zn 富集造成的土壤污染,可能是多年的生长导致土壤质量下降、重金属富集等,当然也可能是种植基地的较多人为活动导致 Zn 含量增加^[25]。

(4) 相关性分析表明,不同生长年限条件下太白贝母根际土壤中重金属积累对土壤酶活性的影响是多种因子的复合作用,即存在协同作用,又具有拮抗作用,这种复合作用导致太白贝母在生长过程中对土壤理化性质具有选择性。

参考文献 (References)

- [1] 国家药典委员会编. 中国药典(2015 年版一部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 36-38.
National Pharmacopoeia Commission. Ch.P(2015 edition)[S]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 36-38(in Chinese).
- [2] 游静, 张德全, 潘兴娇, 等. 高效液相色谱法同时测定太白贝母与暗紫贝母中 9 种核苷类成分的含量[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 174-179.
YOU J, ZHANG D Q, PAN X NNJ, et al. Simultaneous determination of nine nucleosides contents using high performance liquid chromatography in *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li and *Fritillaria unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(1): 174-179(in Chinese).
- [3] 周浓, 郭冬琴, 沈力, 等. 太白贝母与暗紫贝母中 4 种生物碱的含量比较[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 133-136.
ZHOU N, GUO D Q, SHEN L, et al. Comparative contents of four alkaloids in bulbs of *Fritillaria taipaiensis* and *Fritillaria unibracteata*

- [J]. Food Science, 2014, 35(12): 133-136 (in Chinese).
- [4] 周浓, 郭冬琴, 沈力, 等. 太白贝母与暗紫贝母中砷、汞、镉、铅的含量比较[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 67-69.
ZHOU N, GUO D Q, SHEN L, et al. Comparison of the content of arsenic, mercury, cadmium and lead between *Fritillaria taipaiensis* and *Fritillaria unibracteata* by wet digestion-atomic fluorescence spectrum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 67-69 (in Chinese).
- [5] 党华美, 赵欢, 何腾兵, 等. 贵州不同种植年限钩藤土壤重金属的安全评价[J]. 中药材, 2015, 38(11): 2257-2261.
DANG H M, ZHAO H, HE T B, et al. Safety evaluation of heavy metals in soil of *Uncaria rhynchophylla* (Miq.) Miq. ex Havil. in different planting years in Guizhou province[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(11): 2257-2261 (in Chinese).
- [6] 秦樊鑫, 张明时, 张丹, 等. 贵州省地道药材 GAP 基地土壤重金属含量及污染评价[J]. 土壤, 2008, 40(1): 135-140.
QIN F X, ZHANG M S, ZHANG D, et al. Heavy metal contents and pollution evaluation of soils in Chinese Medicinal Herbs GAP Bases in Guizhou Province[J]. Soils, 2008, 40(1): 135-140 (in Chinese).
- [7] 陈碧华, 杨和连, 周俊国, 等. 大棚菜田种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 213-218.
CHEN B X, YANG H L, ZHOU J G, et al. Effect of cultivating years of vegetable field on soil heavy metal content and enzyme activity in plastic shed[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 213-218 (in Chinese).
- [8] 沈力, 周浓, 付绍智, 等. 太白贝母栽培品的生药学研究[J]. 中药材, 2014, 37(1): 45-49.
SHEN L, ZHOU N, FU S Z, et al. Pharmacognostical study on cultivated *Fritillaria Taipaiensis* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2014, 37(1): 45-49 (in Chinese).
- [9] 翟琨. 湖北贝母种植土壤和药材中有机农药及重金属残留分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 976-979.
ZHAI K. Residues' analysis of organic pesticides and heavy metals in a medicinal Herb (*Hubei Fritillaria*) and its planting soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 976-979 (in Chinese).
- [10] 唐力, 夏静芬, 芦晨, 等. 宁波市浙贝母主产地土壤重金属形态分析及污染评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 1171-1176.
TANG L, XIA J F, LU C, et al. On the distribution features and contamination situation assessment of heavy metals in Ningbo soil planting *Fritillaria thunbergii bulbosus* [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 1171-1176 (in Chinese).
- [11] 廖海兵, 李云霞, 邵晶晶, 等. 连作对浙贝母生长及土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2203-2208.
LIAO H B, LI Y X, SHAO J J, et al. Impacts of continuous cropping on *Fritillaria thunbergii* Miq. growth and rhizosphere soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2203-2208 (in Chinese).
- [12] 边雪廉, 岳中辉, 焦浩, 等. 土壤酶对土壤环境质量指示作用的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(4): 634-640.
BIAN X L, YUE Z H, JIAO H, et al. Soil enzyme indication on soil environmental quality: A review [J]. Soils, 2015, 47(4): 634-640 (in Chinese).
- [13] 马世五, 谢德体, 张孝成, 等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8512-8525.
MA S W, XIE D T, ZHANG X C, et al. Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8512-8525 (in Chinese).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-35.
BAO S D. Agricultural soil analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 14-35 (in Chinese).
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 274-339.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986: 274-339 (in Chinese).
- [16] 李忠宝. 农业用地土壤重金属污染特征分析与评价[J]. 南方农业, 2018, 12(32): 187-188.
Li B Z. Analysis and evaluation of heavy metal pollution characteristics of agricultural land [J]. South China Agriculture, 2018, 12(32): 187-188 (in Chinese).
- [17] 国家药典委员会编. 中华人民共和国药典(2015年版 四部) [S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 101-102.
National Pharmacopoeia Commission. Ch.P(2015) [S]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 101-102 (in Chinese).
- [18] 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤, 等. 不同种植年限下山银花产地土壤及花蕾重金属污染特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 310-315, 328.
YAN Q X, HE T B, GAO A Q, et al. Heavy metal contamination characteristics of soil and buds of *Lonicerae flos* in different planting years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 310-315, 328 (in Chinese).
- [19] 杨会玲, 黄仁华, 陈珂, 等. 丛枝菌根真菌 (AMF) 对钝脐迫宿根高粱生长及根际土壤酶的影响[J]. 环境化学, 2015, 34(4): 712-717.
YANG H L, HUANG R H, CHEN K, et al. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth of *Sorghum haijense* and rhizosphere soil enzymes activities under Cs stress [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(4): 712-717 (in Chinese).
- [20] 王怀玉, 马鹏, 彭锐. 不同生长年限太白贝母中贝母辛和总生物碱的含量测定[J]. 中药材, 2011, 34(7): 1034-1037.
WANG H Y, MA P, PENG R. Quantitative determination of peimisin and total alkaloids in *Fritillaria taipaiensis* of different growing stage [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2011, 34(7): 1034-1037 (in Chinese).
- [21] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 848-852.
TANG J, ZHONG Y P, WANG L. Background value of soil heavy metal in the Three Gorges Reservoir District [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 848-852 (in Chinese).
- [22] 胡晰, 马润则, 刘颖倩, 等. 重庆巫溪县文峰地区孤峰组稀土矿化特征及分布情况[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 294-295.
HU X, MA Z R, LIU Y Q, et al. Characteristics and distribution of rare earth mineralization in Gufeng Formation, Wenfeng area, Wuxi County, Chongqing [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 294-295 (in Chinese).
- [23] 周浓, 张杰, 郭冬琴, 等. 三峡库区栽培重楼中重金属元素的含量与评价[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1758-1760.
ZHOU N, ZHANG J, GUO D Q, et al. Content and evaluation of heavy metal elements in cultivated heavy buildings in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9): 1758-1760 (in Chinese).
- [24] 高秀丽, 邢维芹, 冉永亮, 等. 重金属积累对土壤酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(3): 331-336.
GAO X L, XING W Q, RAN Y L, et al. Effects of accumulation of heavy metals in soils on enzyme activities [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(3): 331-336 (in Chinese).
- [25] 张珍明, 乐乐, 林昌虎, 等. 种植年限对山银花土壤质量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 66-72.
ZHANG Z M, LE L, LIN C H, et al. Effect of cultivating years of flos *Lonicerae Confusae* on soil quality [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 66-72 (in Chinese).