

环境因子对多花 精有效成分影响研究

周新华

摘 要:【目的】为探明影响多花黄精根茎中多糖和皂苷这两种次生代谢物含量的关键生态环境因子,揭示适宜多花黄精生长区域的生态环境特征,为合理开发和有效保护多花黄精药用植物资源提供依据。【方法】以全国 14 个分布在不同行政区域的多花黄精为研究对象,比较分析了不同分布区域下多花黄精根茎中多糖和皂苷的差异,并利用灰色关联度分析研究了其与生态环境因子之间的关系。【结果】结果表明:不同分布区域的多花黄精根茎中多糖和皂苷含量差异显著,黄精多糖含量的质量分数为 1.57%~15.57%,黄精皂苷含量的质量分数为 2.27%~3.60%,其中分布在安徽祁门的黄精多糖含量最高、江西赣州的黄精皂苷含量最高,质量分数分别达 15.57%和 3.60%;黄精皂苷含量和黄精多糖含量相关性不显著;影响黄精多糖含量的主导生态环境因子是无霜期、年平均温度和年降水量,影响黄精皂苷含量的主导生态环境因子是 7 月平均温度、无霜期和年日照时数。【结论】为多花黄精高品质药材适宜种植区选择及其道地性药材产生原因分析提供科学依据和理论支持。

关 词: 多花黄精; 环境因子; 多糖; 皂苷; 灰色关联度

Abstract: *Polygonatum cyrtonema* Hua is an herb in the Liliaceae family. Its dried rhizome comprises a traditional and rare Chinese medicinal material. The polysaccharide and saponin contents in the rhizomes of *P. cyrtonema* were compared among plants from 14 administrative regions of China, and their relationships with climate factors were studied using gray correlation analysis. The polysaccharide and saponin contents in the rhizomes of *P. cyrtonema* were significantly different among regions ($p < 0.05$). The mass fractions of the polysaccharide and saponin contents were 1.57-15.57% and 2.27-3.60%, respectively. The highest polysaccharide and saponin contents were in Qimen, Anhui Province, and Ganzhou, Jianxi Province, with mass fraction values of $15.57 \pm 0.24\%$ and $3.60 \pm 0.25\%$, respectively. There was no significant correlation between the saponin and polysaccharide contents of *P. cyrtonema* ($p > 0.05$). The primary climate factors affecting polysaccharide content were duration of the frost-free season, annual mean air temperature, and annual precipitation, and the dominant climate factors affecting saponin content were mean air temperature in July, duration of the frost-free season, and annual sunshine hours. To cultivate native medicinal *Polygonatum* species with high polysaccharide contents, regions with frost-free season, annual mean air temperature, and annual precipitation similar to those of Qimen, Anhui Province, should be selected. Regions with mean air temperature in July, frost-free season, and annual sunshine hours similar to those of Ganzhou, Jiangxi Province, should be selected to cultivate *Polygonatum* species with high saponin contents.

Key words: *Polygonatum cyrtonema*; climate factors; polysaccharide; saponin; gray correlation degree.

药用植物的主要药用活性有效成分大多数来源于其自身的次生代谢所产生的一类物质^[1-2], 次生代谢物生产能力和累积量的高低决定着药材品质^[3], 药用植物的基因型影响着其自身产生某一特定表型的潜力, 但不是最终的决定性因素, 而导致最终一系列可能的, 是基因型和生态环境因子共同作用的结果^[4-7]。通常在种源的基因型确定的情况下, 各种生态环境因子直接决定着其次生代谢途径相关基因的表达, 决定着药材品质的优劣^[8-9]。因此, 要生产高质量的中药材, 除了要选育次生代谢能力强的优良种源外, 还要研究生态环境因子与次生代谢合成的关系, 明确高品质中药材的适生区域, 为道地药材生产提供技术支持和理论支撑^[9-10]。

多花黄精 (*Polygonatum cyrtonema* Hua.) 是百合科黄精属草本植物, 其干燥根茎是我国传统珍贵稀有药食两用中药材黄精^[11-13]。多花黄精主要药用活性有效成分为多糖和皂苷类化合物, 其根茎可入药, 性平、味甘, 入肺、脾、肾经, 具有温润心肺、补中益气、美容养颜、补肾益精、强筋骨、补精髓、益智、舒缓五脏、调寒热等功效^[14-16]。目前, 对多花黄精的研究主要集中在生物学分类^[17]、植物组织培养^{[1}

8-19]、药理药效^[14,20]、化学成分测定和主要药用活性成分提取^[21]等方面，但多花黄精根茎中主要药用活性成分多糖、皂苷类化合物与其生长所处的生态环境因子间的相互作用研究未见报道。本文在我国多花黄精自然分布区域内选取具有代表性的 14 个区域下的多花黄精为研究对象，采用生态学、模糊数学以及统计学方法研究 14 个分布区域的多花黄精根茎中主要药用活性有效成分多糖、皂苷含量的差异，分析多糖、皂苷含量与其生长所处的生态环境因子间的关系，找到影响多糖、皂苷生产和积累的关键生态环境因子，研究结果对明确高药用活性成分多花黄精产地具有重要意义，同时为其它药用植物资源道地药材开发和综合利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试 材料

在查阅相关文献资料的基础上，以行政区划为基本单元确定多花黄精分布区，然后于 2017 年 10 月份分别赴湖南、湖北、浙江、贵州、云南、四川、河北、江西等地采样点实地采集野生多花黄精根茎，利用多点随机采样法采集同一生长地下的块茎，同一生长地设置 3 个采集点，每个采集点相隔直线距离 30m 以上。将同一分布区域的每个采集点的块茎样品在 60℃ 下烘干粉碎，过 60 目孔筛，然后各采集点称取 10g 样品，将同一分布区域的样品均匀混合，干燥保存，供药用有效成分黄精多糖和皂苷测试备用。所采集的样品均经中国林科院亚林中心曾平生高级工程师鉴定为多花黄精 *Polygonatum cyrtonema* 的块茎。各分布区域的气候环境因子数据从中国自然资源数据库中获得，具体见表 1。

表 1 不同分布区域的多花 精样品采 信息及采样点气候环境因子

采样点 Sample site	纬度/N Latitude	经度/E Longitude	海拔 Altitude /m	年平均 温度 AMAT /℃	1 月 平均温度 MAT in Jan/℃	7 月 平均温度 MAT in July/℃	无霜期 Frost-free season/d	年日照 时数 AS H/h	年降 水量 AP/mm
江西鹰潭 JXYT	116 °58' 1 7 "	28 °05' 51 "	121	18.4	5.8	29.7	262	1749.9	1881.8
江西新余 JXXY	114 °32' 3 5 "	27 °37' 18 "	636	17.2	5.5	28.8	270	1535.3	1643.6
湖北宜昌 HBYC	111 °33' 42 " 18 "	30 °44' 18 "	533	16.9	5.4	28.3	275	1710.5	1215.6
浙江丽水 ZJLS	119 °54' 1 3 "	28 °30' 03 "	610	17.8	6.7	28.3	268	1676.6	1568.4
安徽黄山 AHHS	118 °18' 1 2 "	29 °42' 09 "	759	15.5	-2.5	18	236	1750.3	1670
贵州凯里 GZKL	107 °55' 2 8 "	26 °36' 21 "	589	15.3	5.0	27.6	288	1289.1	1240.4
广西桂林 GXGL	110 °35' 2 8 "	25 °26' 32 "	438	18.9	15.6	23.0	309	1670.0	1949.5
湖南衡阳 HNHY	112 °36' 2 0 "	26 °59' 14 "	613	18.2	5.1	27.1	270	1688.9	1510.8
河北承德 HBCD	116 °53' 3 5 "	41 °57' 46 "	1206	9.0	-10.0	24.4	160	2900.0	642.4
江西贵溪 JXGX	117 °02' 2 8 "	28 °18' 31 "	377	18.3	6.2	29.7	262	1749.5	1900
江西赣州 JXGZ	114 °57' 1 8 "	25 °45' 33 "	224	18.8	8.1	29.5	288	1827.7	1605

安徽祁门	117 °4	29 °48'	422	15.6	4.2	26.9	250	1711.5	1781.4
AH QM	2' 31 "	71 "							
浙江遂昌	119 °1	28 °29'	876	16.8	5.0	28.2	251	1755.3	1510
ZJS C	8' 27 "	12 "							
四川南充	105 °4	30 °58'	432	17.0	6.5	27.5	310	1350.0	1100.0
SCN C	6' 18 "	33 "							

AMAT, annual mean air temperature; MAT, mean air temperature; AP, annual precipitation; ASH, Annual sunshine hours.

1.2 仪器

UV-2450 紫外-可见分光光度计（日本岛津公司生产）；M17035 数显电热恒温水浴锅（北京中西远大科技有限公司）；JA10003N 数显电子分析天平（上海精其仪器有限公司）；FQ-1042 变频超声波清洗器（杭州法兰特超声波科技有限公司）；LC-100PHP 型高效液相色谱仪（上海伍丰科学仪器有限公司）；1810-B 型石英自动双重纯水整流器（常州万合仪器制造有限公司）。

1.3 试剂

对照品 D-葡萄糖、薯蓣皂苷均购自于中国药品生物制品检定所；甲醇、无水乙醇、浓硫酸、高氯酸、蒽酮和乙腈等试剂为分析纯；实验用水为二次蒸馏水，其它试剂均为分析纯。

1.4 测定方法

黄精多糖含量的测定参照毕研文等^[22]的蒽酮-硫酸比色法测定其含量，黄精皂苷含量测定参照陈立娜等^[23]的 RP-HPLC 法测定其含量。在测定黄精多糖和黄精皂苷的含量时，将每个地理种源各采样点样品均匀混合，然后每个地理种源称取 1g 样品，用于测定各分布区域下多花黄精块茎两种主要药用有效成分的含量，每个分布区域中黄精多糖、黄精皂苷成分含量一次测定 3 份，重复 5 次，取各次的所测得数据的平均值作为该分布区域下黄精多糖、黄精皂苷的含量值。

1.5 数据分析方法

使用 Microsoft Office Excel 2016 对数据进行整理和相关图表的制作，使用 SPSS19.0 社会统计分析软件中的 one-way ANOVA 模块来比进行方差分析，开展不同分布区域中多花黄精块茎中黄精多糖和黄精皂苷含量的差异分析。使用 DPS 数据统计分析软件进行灰色关联度法运算^[24-28]，并系统分析不同分布区域下多花黄精块茎有效成分含量与主要气候环境因子之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同分布区域下多花 精 2 种药用成分含 比较

不同分布区域下多花黄精根茎中 2 中药用活性成分含量的分析结果见表 2。通过表 2 可知：多花黄精根茎中多糖含量在不同分布区域间存在显著差异，其质量分数的分布区间为 1.57%~15.57%，多糖含量最高的分布区域为安徽祁门区（含量为 15.57%），其次为广西桂林区（含量为 12.48%），含量最低的分布区域是江西宜春区（1.57%）；多花黄精根茎中皂苷含量在不同分布区域间也存在显著差异，其质量分数的分布区间为 2.27%~3.60%，皂苷含量最高的分布区域为江西赣州区（含量为 3.60%），其次为浙江遂昌区（含量为 3.30%），含量最低的分布区域是广西桂林种区（含量为 2.27%）。进一步对不同分布区域间多花黄精根茎中 2 种药用活性成分含量进行相关分析，结果显示黄精多糖含量和黄精皂苷含量表现出负相关关系，但相关程度不显著，表明不同分布区域间根茎中多糖和皂苷含量没有显著的线性关系，在多花黄精多糖和皂苷这 2 中次生代谢物的产生和累积过程中，环境因子对 2 种药用活性成分的影响是相对独立的。

表 2 不同分布区域 多花 精根茎中 2 种药用活性成分含 比较

采样点	黄精皂苷含量	黄精多糖含量	采样点	黄精皂苷含量	黄精多糖含量
Sample site	content of polyg onatum saponin/mg · g ⁻¹	content of pol ygonatum polysacchar ide /mg · g ⁻¹	Sample sit e	content of pol ygonatum saponin/ mg · g ⁻¹	content of pol ygonatum polysacchar ide /mg · g ⁻¹

安徽祁门	2.82±0.14abcd	15.57±0.24e	江西赣州	3.60±0.25d	8.84±0.01d
ANQM			JXGZ		
四川南充	3.24±0.10cd	9.10±0.03d	湖北宜昌	2.67±0.11cd	7.74±0.06cd
SCNC			HBVC		
浙江遂昌	3.30±0.09cd	2.96±0.08b	贵州凯里	3.23±0.20cd	7.94±0.20cd
ZJSC			GZKL		
江西鹰潭	3.12±0.17bcd	4.32±0.06b	河北承德	3.21±0.23cd	2.69±0.06b
JXYT			HBCD		
安徽黄山	3.20±0.13cd	8.19±0.17cd	广西桂林	2.27±0.12a	12.48±1.33de
AHHS			GXGL		
湖南衡阳	2.33±0.04ab	6.99±0.03b	浙江丽水	2.77±0.20abcd	3.57±0.16ab
HNHY			ZJLS		
江西宜春	2.66±0.09abc	1.57±0.03a	江西贵溪	3.01±1.10abcd	1.89±0.14a
JXYC			JXGX		

注：同列中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different small letters within the same column represent significant differences among groups(P<0.05).

2.2 环境因子与 2 种药用成分含 灰色关联度分析

分别以 14 个不同分布区域下多花黄精根茎中的多糖和皂苷含量作为母因素 X_i ($i=1,2$)，以 14 个不同分布区域的环境因子作为子因素 Y_i ($i=1,2,3,4,5,6,7$)，然后按照灰色关联度分析方法对数据处理的要求，对母因素和子因素数据采用均值化法进行无量纲处理，按照对应的公式，求出各环境因子与黄精多糖和黄精皂苷关联系数和等权关联度，并得到相应的等权关联序（表 3 和表 4）。

由表 3 可知，影响多花黄精根茎中多糖含量的生态环境因子依次是：无霜期 ($\gamma_5=0.776$) > 年平均温度 ($\gamma_2=0.755$) > 年降水量 ($\gamma_7=0.745$) > 7 月平均温度 ($\gamma_4=0.732$) > 年日照时数 ($\gamma_6=0.718$) > 海拔 ($\gamma_1=0.690$) > 1 月平均温度 ($\gamma_3=0.675$)。可见，在影响多花黄精根茎中多糖含量的生态环境因子中，无霜期最大，其次是年平均温度，而 1 月平均温度最小，这表明无霜期是决定多花黄精根茎中多糖次生代谢累积的关键环境因子，其次年平均温度也在影响多花黄精多糖成分代谢累积的过程中起了很大作用。

由表 4 可知，影响多花黄精皂苷含量的环境因子依次是：7 月平均温度 ($\gamma_4=0.928$) > 无霜期 ($\gamma_5=0.920$) > 年日照时数 ($\gamma_6=0.918$) > 年平均温度 ($\gamma_2=0.912$) > 年降水量 ($\gamma_7=0.877$) > 海拔 ($\gamma_1=0.833$) > 1 月平均温度 ($\gamma_3=0.776$)。可见，在影响多花黄精根茎中皂苷含量的生态环境因子中，7 月平均温度最大，其次是无霜期，而 1 月平均温度最小，这表明 7 月平均温度是决定多花黄精根茎中皂苷次生代谢累积的关键环境因子，其次无霜期在多花黄精皂苷成分代谢累积的过程中也具有较大影响。

表 3 精多糖含 与生态环境因子的关联度

采样点 Sample site	海拔 Altitude	年平均 温度 AMAT	1 月平 均温度 MAT in Jan	7 月平 均温度 MAT in July	无霜期 Frost-free s eason	年日照 时数 ASH	年降 水量 AP
安徽祁门	0.447	0.478	0.468	0.490	0.480	0.487	0.526
ANQM							
四川南充	0.686	0.793	1.000	0.794	0.878	0.688	0.669
SCNC							
浙江遂昌	0.531	0.694	0.677	0.679	0.716	0.693	0.698
ZJSC							
江西鹰潭	0.750	0.737	0.690	0.737	0.788	0.782	0.682
JXYT							
安徽黄山	0.910	0.816	0.420	0.698	0.798	0.859	0.919
AHHS							
湖南衡阳	0.967	0.970	0.984	0.979	0.991	0.952	0.972
HNHY							
江西宜春	0.585	0.616	0.580	0.604	0.618	0.664	0.600
JXYC							
江西赣州	0.581	0.873	0.771	0.855	0.852	0.829	0.834
JXGZ							
湖北宜昌	0.867	0.905	0.992	0.930	0.923	0.886	0.786
HBVC							
贵州凯里	0.910	0.829	0.909	0.892	0.936	0.743	0.779
GZKL							

河北承德 HBCD	0.420	0.907	0.336	0.718	0.866	0.501	0.989
广西桂林 GXGL	0.541	0.636	0.472	0.558	0.649	0.585	0.690
浙江丽水 ZJLS	0.697	0.706	0.593	0.712	0.727	0.749	0.719
江西贵溪 JXGX	0.767	0.610	0.555	0.608	0.643	0.638	0.567
等权关联度	0.690	0.755	0.675	0.732	0.776	0.718	0.745
等权关联序	6	2	7	4	1	5	3

表 4 精皂苷含 与生态环境因子的关联度

采样点 Sample site	海拔 Altitude	年平均 温度 AMAT	1 月平 均温度 MAT in Jan	7 月平 均温度 MAT in July	无霜期 Frost-free s eason	年日照 时数 ASH	年降 水量 AP
安徽祁门 ANQM	0.892	0.992	0.961	0.972	0.999	0.981	0.878
四川南充 SCNC	0.832	0.955	0.856	0.957	0.955	0.834	0.813
浙江遂昌 ZJSC	0.781	0.937	0.962	0.960	0.907	0.938	0.931
江西鹰潭 JXYT	0.656	0.973	0.908	0.973	0.963	0.971	0.897
安徽黄山 AHHS	0.855	0.913	0.498	0.795	0.895	0.956	0.989
湖南衡阳 HNHY	0.840	0.842	0.850	0.881	0.873	0.899	0.886
江西宜春 JXYC	0.872	0.926	0.863	0.905	0.930	0.991	0.897
江西赣州 JXGZ	0.663	0.949	0.766	0.932	0.929	0.908	0.913
湖北宜昌 HBYC	0.970	0.935	0.873	0.915	0.920	0.952	0.944
贵州凯里 GZKL	0.977	0.902	0.976	0.961	1.000	0.820	0.854
河北承德 HBCD	0.599	0.747	0.334	0.902	0.771	0.733	0.709
广西桂林 GXGL	0.992	0.815	0.389	0.950	0.800	0.894	0.756
浙江丽水 ZJLS	0.914	0.926	0.773	0.935	0.955	0.985	0.944
江西贵溪 JXGX	0.823	0.955	0.849	0.951	0.985	0.994	0.873
等权关联度	0.833	0.912	0.776	0.928	0.920	0.918	0.877
等权关联序	6	4	7	1	2	3	5

3 讨论

多花黄精是重要的药食两用大宗中药材，在野生天然分布的情况下其根茎多糖和皂苷含量与其所处的生态环境因子关系非常紧密，然而天然分布状态下其所处的生态环境因子异常复杂，具有丰富的多样性，多花黄精根茎中多糖和皂苷的含量与生态环境因子之间的关系难于用简单的统计方法来分析。灰色关联分析是通过对系统中各因素的量化分析，比较各研究序列的统计集合关系，分析多因素间的关联程度，特别适用于部分信息已知、部分信息未知的不确定性系统^[5,29]。在不确定性系统内，若两个因素的变化趋势具有一致性，则二者关联程度较高；若两个因素的变化趋势不具有一致性，则两者的关联程度就低^[29]。多花黄精根茎中多糖、皂苷含量与其所处的生态环境因子间的关系属于一个灰色系统，本文运用灰色关联度法来分析影响野生天然分布状态下多花黄精根茎中多糖和皂苷的生态环境因子，避免了使用多元线性回归分析、相关分析等简单的统计分析方法^[30-32]，因数据量不足而导致的分析结果失真、分析方法单一、生态环境因子稀少、缺乏综合性和整体性评价等问题，更适合大尺度范围内的生态环境分析，分析得到的结论也更可靠^[33]，揭示出影响多花黄精根茎多糖、皂苷含量的生态环境因子。

药用植物中的次生代谢成分的形成和积累除了由其遗传特性决定外，还与其生态环境因素密切相关^[1]。

本研究结果表明,适当的温度对多花黄精根茎中多糖、皂苷这两种次生代谢物的合成和积累影响非常大,表现为年平均温度对多花黄精根茎中多糖含量的影响在所有生态环境因子里面排名第二位,7月平均温度对多花黄精根茎中皂苷含量的影响在所有生态环境因子中排名第一,而1月平均温度对多花黄精根茎中多糖和皂苷的影响均排在所有环境因子的末位。主要原因是在多花黄精天然分布区域内,由于1月平均温度较低而多花黄精处于停滞生长的休眠期,而7月平均温度和年平均温度能够显著影响多花黄精的生长周期和黄精多糖、皂苷的生成积累,也可能与其生长过程中多糖类和皂苷类合成途径中相关酶的活性增加有关[34]。

本研究通过灰色关联度分析方法,虽然得到了影响多花黄精根茎中多糖、皂苷含量的主要关键因子和及排序,也可以依据关键生态因子的影响大小指导生产和人工栽培,但是各关键生态因子是具体如何影响多花黄精根茎中多糖和皂苷生成及积累的机制却不明确,这在以后的研究中有待于进一步量化开展。

4 结论

本文研究了全国分布区具有代表性的14个不同分布区域内多花黄精根茎中主要药用次生代谢物含量的空间变化,采用邓肯多范围检验法比较了不同分布区域多花黄精根茎中多糖、皂苷的差异,使用灰色关联度法讨论了影响多花黄精根茎中多糖、皂苷含量的生态环境因子。研究表明:全国14个不同分布区域的多花黄精根茎中多糖和皂苷的含量随地理环境的变化而差异显著;无霜期、年平均温度、年降水量是影响多花黄精根茎中多糖含量的主导生态环境因子,其中无霜期是最重要的生态环境因子,当多花黄精所处的生长环境形成霜冻时,会造成多花黄精休眠或产生冻害现象,其次代谢过程也将彻底停止;7月平均温度、无霜期、年日照时数是影响多花黄精根茎中皂苷含量的主导生态环境因子,其中7月平均温度是最为重要的生态环境因子,在多花黄精生长季7月平均温度过低将不利于黄精皂苷的积累,广西桂林种源7月平均温度为23℃,导致黄精皂苷含量最低,而7月平均温度在29.5℃的江西赣州黄精皂苷含量却最高,由此可认为29.5℃左右是多花黄精皂苷代谢积累的适应生长温度条件。

生态环境因子是影响多花黄精根茎中多糖、皂苷含量的重要因素。本文的研究结果,可对多花黄精的产业化和人工模拟道地药材开发利用具有一定的科学指导意义,在生产实际中,人们希望种植出有效药用活性成分含量高的中药材,来满足人们对高品质药材的需求,因此,若希望得到黄精多糖含量高的药材应选择无霜期、年平均温度、年降水量与安徽祁门相似的地方来种植,若想得到黄精皂苷含量高的药材因选择7月平均温度、无霜期、年日照时数与江西赣州相似的地方来种植。另外,在人工选择栽培基地时,可参照本研究结论进行选择或人为模拟改造。

参 考 文 献

- [1] Lu SP, Sui XX, Sun Q, *et al.* Biological Functions of Secondary Metabolism of Medicinal Plants and Influences of Ecological Environment [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2006, 18:1027-1032.
- [2] Qiu DY. Progresses in the study of genetic regulation of effective constituent in medical plants [J]. *World Sc and Tech/Moder Tradt Ch n Med*, 2000,2(3):30-34.
- [3] Luo J, Wang Y, Zheng YJ, *et al.* Plant natural products and synthetic biology [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(8):1345-1347.
- [4] Xu HB, Song JY, Luo HM, *et al.* Analysis of genome sequence of the medicinal plant *Salvia miltiorhiza* [J]. *Mol Plant*, 2016,9(6):949.
- [5] Grimplet J, Wheatley MD, Jouira HB, *et al.* Proteomic and selected metabolite analysis of grape berry tissues under well-watered and water-deficit stress conditions [J]. *Proteomics*, 2009, 9(9):2503.
- [6] Komis G, Apostolakis P, Galatis B. Altered patterns of tubulin polymerization in dividing leaf cells of *Chlorophyton comosum* after a hyperosmotic treatment [J]. *New Phytologist*, 2001, 149(2): 193.
- [7] Esam AH, Esam MA. Effect of mannitol and sodium chloride on some totle secondary metabolites fenugreek calli cultured *in vitro* [J]. *Plant Tissue Cult. & Biotech*, 2011,21(1):35.

- [8] Hong J, Yang L, Zhang D, *et al.* Plant metabolomics: an indispensable system biology tool for plant science [J]. *Int J Mol Sci*, 2016,17(6):767.
- [9] Liu W, Wang DM, Kang YX, *et al.* Grey correlation analysis between main climatic factors and active compounds, antioxidant activity of *Potentilla glabra* leaves [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(8):25-30.
- [10] Peplow M. Synthetic biology's first malaria drug meets market resistance [J]. *Nature*, 2016, 530(7591): 389-390.
- [11] 中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京: 科学出版社, 1979.
- [12] Zhou XH, Li YQ, Wang LY, *et al.* An efficient proliferation and inducing roots system of tissue culture in *Polygonatum cyrtonema* [J]. *Nonwood Forest Research*, 2016, 34(1):51-56.
- [13] Zhou XH, Zeng MS, Xiao ZY, *et al.* Tender stems and rhizome buds in vitro culture techniques in *Polygonatum cyrtonema* [J]. *Nonwood Forest Research*, 2014, 32(4):68-72.
- [14] Zhao WL, Zhao Y, Yiider T. Research progress on pharmacological effects of *Polygonati Rhizoma* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018,49(18):4439-4445.
- [15] Zhou X, Zhang Y, Zhao H, *et al.* Antioxidant homoisoflavonoids from *polygonatum odoratum* [J]. *Food Chem*, 2015,186:63-68.
- [16] Khan H, Saeed M, Mehmood MH, *et al.* Studies on tracheorelaxant and anti-inflammatory activities of rhizomes of *polygonatum verticillatum* [J]. *BMC Compl Altern Med*, 2013, 13(1):1-8.
- [17] Li JH, Zhou SB, Wang Y, *et al.* Leaf comparative anatomy of *Polygonatum cyrtonema* from five populations [J]. *Guihaia*, 2007, 27(6):826-831.
- [18] Mo YS, Lu TF, Qiu ZH, *et al.* Study on the tissue and rapid propagation system of *Polygonatum cyrtonema* Hua [J]. *Mod Chin Med*, 2018, 20(4):445-449.
- [19] Rao BR, Xie DQ, Chen YH, *et al.* Study on technology of tissue and rapid propagation for *Polygonatum cyrtonema* seedlings [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(2):46-49.
- [20] Tao AE, Zhang XC, Du ZF, *et al.* Research progress on flavonoids in plants of *Polygonatum* Mill. And their pharmacological activities [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, 49(9):2163-2171.
- [21] Xu JX, Liu L, Yang SX, *et al.* Chemical constituents from aerial part of *Polygonatum cyrtonema* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2016, 47(20):3569-3572.
- [22] 毕研文,杨永恒,宫俊华,等. 黄精和多花黄精中多糖及薯蓣皂苷元的含量测定[J]. 长春中医药大学学报,2010,05:649-650.
- [23] 陈立娜,都述虎,高艳坤,等. RP-HPLC 法测定黄精中薯蓣皂苷元含量[J]. 现代中药研究与实践,2006,04:32-34.
- [24] 李倩,梁宗锁,董娟娥,等. 丹参品质与主导气候因子的灰色关联度分析[J]. 生态学报,2010,30(10):2569-2575.
- [25] 黄祥童,王建刚,赵伟,等. 林下山参生长指标与土壤性状的灰色关联度和通径分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(3):49-54.
- [26] 吴国霞,杨秀娟,邓毅,等. 基于灰色关联度的当归及其不同药用部位质量评价研究[J]. 中国中医药信息杂志,2018,25(5):77-81.
- [27] 周国强,陈彩虹,薛轶,等. 基于灰色关联度分析的森林景观类型环境耦合度研究[J]. 西北林学院学报,2018,33(2):219-223+262.
- [28] 蔡萍,刘才英,梁雪娟,等. 杜仲药材有效成分与环境因子的灰色关联度分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2014,20(23):10-14.
- [29] 湛社霞,匡耀求,阮柱,等. 基于灰色关联度的粤港澳大湾区空气质量影响因素分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2018,58(8):761-767.
- [30] 叶钱,蒋燕锋,冯家骏,等. 多花黄精有效成分与主要环境因子的相关性[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(1):192-196.
- [31] 孙芳芳. 浅议灰色关联度分析方法及其运用[J]. 科技信息,2010,27(17):364.
- [32] 蔡萍,刘才英,梁雪娟,等. 杜仲药材有效成分与环境因子的灰色关联度分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2014,20(23):10-14.
- [33] 尹艺凝,张文辉. 栓皮栎栲胶品质与生态因子的相关分析[J]. 林业科学,2014,50(8):30-38.
- [34] Leyva a, Jarillo Ja, Salinas J, *et al.* Low temperature induces the accumulation of phenylalanine ammonia-lyase and chalcone synthase mRNAs of *Arabidopsis thaliana* in a light-dependent manner[J]. *Plant Physiology*, 1995,108:39-46.