

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019051201

张成丽, 钱静, 张伟平, 等. 观赏性植物对土壤重金属的修复效果及其环境效应分析——以开封市菊花为例[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1883-1893.

ZHANG Chengli, QIAN Jing, ZHANG Weiping, et al. Study on the remediation effect and environmental benefits of ornamental plants on heavy metal soil: A case study of Kaifeng City chrysanthemum[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(7): 1883-1893.

观赏性植物对土壤重金属的修复效果及其环境效应分析 ——以开封市菊花为例*

张成丽^{1,2,3} 钱静¹ 张伟平¹ 雷雨辰¹ 王少愚¹ 刘景超¹
郭志永^{1**} 马建华^{4,5} ZHANG Chaosheng⁶

- (1. 河南大学环境与规划学院, 开封, 475001; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室(河南大学), 开封, 475001;
3. 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 开封, 475001; 4. 河南省环境与健康工程技术研究中心(河南大学), 开封, 475001;
5. 河南省土壤重金属污染控制与修复工程研究中心(河南大学), 开封, 475001;
6. School of Geography and Archaeology, National University of Ireland, Galway, Ireland)

摘要 为了解观赏性植物对土壤重金属污染的修复效果,以开封市5种菊花(金皇后、墨菊、孔雀草、粉旭桃、玛格丽特菊)为研究对象,分析菊花以及土壤样品中镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)等5种重金属元素的含量,分析菊花对土壤重金属的富集、转移能力.采用单因子指数法、内梅罗综合指数法评价土壤环境质量,并采用模糊综合评价法进一步分析菊花带来的环境效益.结果表明,土壤中5种重金属的含量由大到小为:Zn > Pb > Cu > Cr > Cd,土壤重金属为轻度污染,且Cd对综合指数贡献最大;富集能力方面,所选菊花对5种重金属均能够富集;转移能力方面,金皇后的能力最强,其由强到弱的排序为Cr > Cd > Pb > Zn > Cu;环境效益分析,以开封菊花为例,2016—2018年开封菊花日滞尘量、日释氧量、日固碳量随着菊花的增多而增强.

关键词 植物, 重金属, 菊花, 修复作用, 环境效益.

Study on the remediation effect and environmental benefits of ornamental plants on heavy metal soil: A case study of Kaifeng City chrysanthemum

ZHANG Chengli^{1,2,3} QIAN Jing¹ ZHANG Weiping¹ LEI Yuchen¹ WANG Shaoyu¹
LIU Jingchao¹ GUO Zhiyong^{1**} MA Jianhua^{4,5} ZHANG Chaosheng⁶

- (1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, 475001, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng, 475001, China;
3. National Demonstration Center for Environmental and Planning, Henan University, Kaifeng, 475001, China;
4. Engineering Technology Research Center of Environment and Health (Henan University), Kaifeng, 475001, China;
5. Henan Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution (Henan University), Kaifeng, 475001, China; 6. School of Geography and Archaeology, National University of Ireland, Galway, Ireland)

2019年5月12日收稿(Received: May 12, 2019).

* 国家自然科学基金(41601522), 中国博士后科学基金(2017M612387), 2017年下半年河南省博士后科学基金(165913)和河南大学大学生创新创业训练计划项目资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41601522), China Postdoctoral Science Foundation (2017M612387), Henan Postdoctoral Science Foundation (165913) and Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship of Henan University.

** 通讯联系人, Tel: 0371-23881850, E-mail: guozy9888@163.com

Corresponding author, Tel: 0371-23881850, E-mail: guozy9888@163.com

Abstract: In order to find out the effect of ornamental plants on the soil heavy metal pollution, five kinds of chrysanthemum, such as *Chrysanthemum morifolium*, *Dendranthema morifolium*, *Tagetes patula*, *Dendranthema morifolium* and Margaret (*Argyranthemum frutescens*) are used as analysis object. Analysis of five heavy metal elements of Cd, Cr, Cu, Pb and Zn in chrysanthemum and soil samples. The ability of chrysanthemum to enrich and transfer heavy metals in soil was analyzed. Quality of soil was assessed using the single-factor index method, and the Nemeru comprehensive index method, and the environmental benefits brought by chrysanthemum were evaluated using the Fuzzy comprehensive evaluation method. The results showed that the content of five heavy metals in the soil ranked as Zn > Pb > Cu > Cr > Cd, the soil was at the levels of slight pollution, the maximum contribution rates of composite pollution index were Cd. In terms of enrichment ability, selected chrysanthemums had a certain absorption capacity for Cd, Cr, Cu, Pb and Zn, in terms of transfer ability, the *Chrysanthemum morifolium* had the strongest ability, transfer ability followed the order: Cr > Cd > Pb > Zn > Cu. Analysis of environmental benefits from chrysanthemum in Kaifeng, the daily dust retention, the amount of oxygen released and fixed carbon dioxide content per day of chrysanthemum were enhanced with the increase of the amount of chrysanthemums.

Keywords: ornamental plants, heavy metals, chrysanthemum, remedial effects, environmental benefits.

随着城市化、工业化的发展,污泥、垃圾农用、污水农灌、大气中污染物沉降、含重金属矿质化肥、农药长期施用于农田等活动,造成土壤中重金属的不断积累,土壤被污染^[1-9].而传统物理、化学、物理化学修复技术的应用对土壤结构有一定的影响^[10-12],且修复投入资金较大、耗时耗力,而观赏性植物作为修复植物进行土壤重金属污染的修复,不仅可以修复土壤重金属污染,而且可以健全城市生态环境、美化城市面貌、提升城市的整体环境质量.

近年来,国内外学者对观赏性植物的土壤修复作用做出一些研究.Prasann 等^[13]进行观赏性植物对土壤、淤泥重金属修复研究,结果表明,光叶子花、海岛巴豆、使君子、花叶榕、红椿、阔荚合欢可用于清除土壤、污泥中的重金属.方松林^[14]针对不同园林植物对土壤重金属的吸收及修复效应的研究,海桐、广玉兰等对重金属 Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 的吸收、富集效果较好.崔爽等^[15]进行花卉对铅污染土壤的修复研究,结果表明,供试花卉中瓜叶菊地上部富集铅的量最大,积累铅能力最强,其次为六倍利,串红吸收铅能力最弱.因此,开展菊花对不同重金属的富集与修复效果能力研究,具有重要的意义.

自 1983 年以来,“中国开封菊花花会”每年 10 月份举行,有多种菊花参展,因此,选用参展菊属植物金皇后 (*Chrysanthemum morifolium*)、墨菊 (*Dendranthema morifolium* cv ‘Black Chrysanthemum’)、孔雀草 (*Tagetes patula*)、粉旭桃 (*Dendranthema morifolium*)、玛格丽特菊 (*Argyranthemum frutescens*) 对土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的富集转移能力、土壤修复效率进行研究,并进一步分析菊花带来的环境效益,为利用菊属植物修复土壤重金属提供理论依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况与样品来源

开封市位于黄河中下游,太行山脉东南方,地处河南省中东部,东经 113°52′15″—115°15′42″,北纬 34°11′45″—35°01′20″,年均气温为 14.5 °C,年均降水量为 627 mm,暖温带大陆性季风气候.取开封市东郊污灌区土壤作为供试土壤,质地为壤土,有机质少,孔隙度约为 43.3%—50.3%,密度为 1.32—1.50 g·cm⁻³.在开封市菊花种植基地选取 5 种菊花幼苗,即金皇后、墨菊、孔雀草、粉旭桃、玛格丽特菊,在其生长初期移至花盆中培养.菊花盛开至衰败为 1 个实验周期,待周期结束取土壤及菊花样品.

1.2 指标测定

1.2.1 土壤 pH 测定

按照《土壤农业化学分析方法》中的方法,采用水土比 2.5:1 的方法,取通过 10 目尼龙筛的风干土

样 10.0 g 于 50.0 mL 烧杯中,加入 0.01 mol·L⁻¹氯化钙溶液,玻璃棒搅动 1—2 min,静置 30 min,避免空气中氨或挥发性酸性气体等的影响,用 pH 计测定^[16]。

1.2.2 土壤及菊花重金属含量的测定

在实验室,取供试土壤(东郊污灌区土壤)样品以及菊花根际土壤,分析土壤中重金属的含量。根际土壤取自菊花生长所在土层相应土壤,刮去土壤表层 0.50 cm 的表土后,取植物相应根区的土壤样品。土壤样品于室内常温风干,去除动植物残体、石块等杂物,玛瑙研钵将其粉碎后过 100 目尼龙筛,充分混匀,土壤样品取 0.10 g(误差±0.0005),采用硝酸-氢氟酸-高氯酸三酸消解法进行消解^[17-19],消解好的样品按编号保存至聚乙烯瓶内,备用。

采集植物样品,将植物样品的根、茎、叶、花瓣、花心依次分开,分别用自来水充分冲洗,去除粘附于植物样品上的泥土、污物,再用去离子水冲洗 3 次,然后在 70 °C 下于烘箱中烘至恒重,粉碎机进行粉碎,植物样品称取 0.50 g(误差±0.0005),植物样品采用硝酸-高氯酸消解法消解。消解好的样品按编号保存至聚乙烯瓶内,根际土壤及菊花内重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 含量选用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, ICAP6200, 美国赛默飞世尔公司)进行测量,以待分析。按规范要求质量控制,以确保实验数据准确可靠。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法

土壤重金属污染评价以我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)农用地土壤污染风险筛选值为参照,采用单因子指数法^[20]进行评价分析,单因子指数法以介质中某单个污染物质含量与该物质的限值的比值为判断标准,来评价土壤重金属污染状况的方法。计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤中污染元素 i 的实测值; C_0 为土壤中污染元素 i 的评价标准。 $P_i \leq 1$ 表示无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染。

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[21]是在单因子污染指数法的基础上,计算其平均值、最高值平方加、后再开方,此方法综合考虑多种重金属的联合污染情况,突出高质量分数的污染物对环境产生的影响,并能综合且科学地反映评价区域的总体环境质量状况。计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\overline{P_i})^2 + \max(P_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 内梅罗综合污染指数, $(\overline{P_i})^2$ 为土壤中所有重金属单因子指数平均值的平方; $\max(P_i)$ 为土壤中所有重金属单因子指数最大污染指数。且当 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 时,土壤样品污染等级为安全; $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 时,为警戒级; $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 时,为轻度污染; $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 时,为中度污染; $P_{\text{综}} > 3.0$ 时,为重度污染。且 P_i 、 $P_{\text{综}}$ 值越大^[22],表明样品受污染越严重。

1.3.3 富集系数与转移系数

富集系数反映植物将土壤中重金属元素转移到植物体内的能力,富集系数越大,则植物对该种重金属从土壤向体内的迁移能力越强。转移系数反应植物将该重金属从根部向地上部分转移能力的大小,采用富集系数^[23]与转移系数^[24]进行分析,计算公式如下:

$$\text{BCF} = \frac{C_{\text{pi}}}{C_{\text{si}}} \quad (3)$$

$$\text{TF} = \frac{C_{\text{oi}}}{C_{\text{wi}}} \quad (4)$$

式中, C_{pi} 指植物中某污染物含量; C_{si} 指土壤中该污染物含量; C_{oi} 指植物地上部分重金属的量; C_{wi} 指植物根中该重金属的量。

1.3.4 释氧固碳量与滞尘量

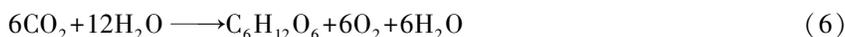
固碳释氧^[25]指的是植物通过光合作用将二氧化碳(CO₂)转换为氧气(O₂),同时将二氧化碳中的碳

固定到植物体内.计算植物的净同化量,公式如下^[26]:

$$P = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600/1000] \quad (5)$$

其中, P 为测定日的同化总量($\text{mmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); P_i 为初测点的瞬时光合作用速率; P_{i+1} 为下一测点的瞬时光合作用速率($\text{mmol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); t_i 为初测点的瞬时时间; t_{i+1} 为下一测点的时间(h); j 为测试次数.

光合作用的反应方程,如下式:



依据光合作用反应方程、净同化量的计算公式,可以换算出植物叶片 CO_2 固定量,计算公式如下:

$$W_{\text{CO}_2} = P \times 44/1000 \quad (7)$$

$$W_{\text{O}_2} = P \times 32/1000 \quad (8)$$

W_{CO_2} 为单位面积叶片固定 CO_2 的质量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); W_{O_2} 为单位叶面积叶片释放 O_2 量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);44、32 分别为 CO_2 、 O_2 的摩尔质量.

植物的滞尘量指单位叶面积滞留的粉尘重量,计算公式如下^[27]:

$$\text{单位叶面积滞尘量}(\text{g} \cdot \text{m}^{-2}) = (W_2 - W_1)/A \quad (9)$$

雨后 1 周,随机采集植物叶片,用蒸馏水对叶片进行 2 h 的冲洗与浸泡,直至所有叶片粘附成分被清洗,取出叶片并将其晾干.用已经烘干称重的滤纸(W_1),对叶片浸洗液进行过滤,再将过滤后的滤纸于 110°C 烘箱中烘干,再次称得滤纸重量(W_2).

蒸腾总量为该植物在测定日的总蒸腾量,计算公式如下^[28]:

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600/1000] \quad (10)$$

式中, e_i 为初测点的蒸腾速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); e_{i+1} 为下一测点的蒸腾速率; t_i 为初测点瞬时时间(h); t_{i+1} 为下一测点瞬时时间(h); j 为测试次数.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 供试土壤理化性质分析及风险评价

依照上述单因子指数法与内梅罗综合污染指数法对开封市东郊污灌区土壤进行评价,结果见表 1.由表 1 可知,土壤中 pH 值为 7.43,土壤中有机质含量为 $12.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,质地为壤土,农用地土壤污染风险筛选值分别为 0.30、200、100、120、250 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,河南省土壤背景值分别为 0.06、63.2、20.0、22.3、62.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤中 5 种重金属的含量分别为 0.77、51.0、52.5、61.4、123 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,从大到小的顺序为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd}$,Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 40.1%、21.9%、37.3%、61.5%、68.8%,均在 10%—100%之间,属于中等变异.土壤中 5 种重金属的 P_i 分别为 2.55、0.25、0.52、0.51、0.49,说明处于 Cd 轻度污染状态,其余重金属处于无污染状态,内梅罗综合污染指数为 1.91,土壤总体处于轻度污染状态.

表 1 土壤重金属的风险评价

Table 1 Risk assessment of heavy metals in soils

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含量 Content/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.77	51.0	52.5	61.4	123
变异系数 Coefficient of variation/%	40.1	21.9	37.3	61.5	68.8
土壤污染风险筛选值 Soil pollution risk screening value/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.30	200	100	120	250
河南省土壤背景值 Henan soil background value/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.06	63.2	20.0	22.3	62.5
有机质 Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			12.8		
pH			7.43		
P_i	2.55	0.25	0.52	0.51	0.49
$P_{\text{综}}$			1.91		

2.2 菊花根际土壤中重金属含量分析

按照上述的试验方法进行处理(表2)。由表2可知,金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊根际土壤中 Cd 含量分别为 0.28、0.23、0.3、0.18、0.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是河南省土壤背景值(0.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 4.67、3.83、5.00、3.00、2.17 倍,其中粉旭桃根际土壤中 Cd 含量最高,玛格丽特菊根际土壤中 Cd 含量最低,按照从高到低的排序为粉旭桃 > 金皇后 > 墨菊 > 孔雀草 > 玛格丽特菊。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊根际土壤中 Cr 含量分别为 5.35、2.88、1.18、4.03、1.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是河南省土壤背景值(63.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 0.08、0.05、0.02、0.06、0.02 倍,其中金皇后根际土壤中 Cr 含量最高,粉旭桃根际土壤中 Cr 含量最低,按照从高到低的排序为金皇后 > 孔雀草 > 墨菊 > 玛格丽特菊。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊根际土壤中 Cu 含量分别为 29.0、25.5、9.10、6.80、10.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是河南省土壤背景值(20.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.45、1.27、0.46、0.34、0.53 倍,其中金皇后根际土壤中 Cu 含量最高,孔雀草根际土壤中 Cu 含量最低,按照从高到低的排序为金皇后 > 墨菊 > 玛格丽特菊 > 粉旭桃 > 孔雀草。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊根际土壤中 Pb 含量分别为 35.7、27.3、15.5、13.8、13.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是河南省土壤背景值(22.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1.60、1.22、0.70、0.62、0.61 倍,其中金皇后根际土壤中 Pb 含量最高,玛格丽特菊根际土壤中 Pb 含量最低,按照从高到低的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草 > 玛格丽特菊。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊根际土壤中 Zn 含量分别为 48.4、39.8、29.6、16.9、15.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是河南省土壤背景值(62.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 0.77、0.64、0.47、0.27、0.25 倍,其中金皇后根际土壤中 Zn 含量最高,玛格丽特菊根际土壤中 Zn 含量最低,按照从高到低的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草 > 玛格丽特菊。

表 2 不同植物根际土壤重金属的含量

Table 2 Soil heavy metals in rhizosphere of different plants

植物 Species	重金属 Heavy metal		pH	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	河南省土壤背景值 Soil backgroundvalue of Henan Province/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	元素 Element	含量 Content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			
金皇后 <i>Chrysanthemum morifolium</i>	Cd	0.28	7.35	14.3	0.06
	Cr	5.35			
	Cu	29.0			
	Pb	35.7			
	Zn	48.4			
墨菊 <i>Dendranthema morifolium</i> cv 'Black Chrysanthemum'	Cd	0.23	7.22	8.9	0.06
	Cr	2.88			
	Cu	25.5			
	Pb	27.3			
	Zn	39.8			
粉旭桃 <i>Dendranthema morifolium</i>	Cd	0.30	7.36	13.6	0.06
	Cr	1.18			
	Cu	9.10			
	Pb	15.5			
	Zn	29.6			
孔雀草 <i>Tagetes patula</i>	Cd	0.18	7.5	21.4	0.06
	Cr	4.03			
	Cu	6.80			
	Pb	13.8			
	Zn	16.9			
玛格丽特菊 <i>Argyranthemum frutescens</i>	Cd	0.13	7.33	16.1	0.06
	Cr	1.55			
	Cu	10.7			
	Pb	13.6			
	Zn	15.4			

2.3 菊花重金属含量与富集系数的比较

2.3.1 菊花重金属含量分析

依照上述方法,由 ICP-AES 测得菊花不同部位重金属的含量,结果见表 3.

表 3 不同菊花重金属含量与富集转移系数

Table 3 Heavy metal content and concentration and transfer coefficient of different chrysanthemum

重金属 Heavy metal		金皇后	墨菊	粉旭桃	孔雀草	玛格丽特菊
		<i>Chrysanthemum morifolium</i>	<i>Dendranthema morifolium</i> cv 'Black Chrysanthemum'	<i>Dendranthema morifolium</i>	<i>Tagetes patula</i>	<i>Argyranthemum frutescens</i>
Cd	上部 Up/(mg·kg ⁻¹)	0.73	0.11	0.09	0.03	0.19
	下部 Down/(mg·kg ⁻¹)	0.58	0.38	0.75	0.13	0.23
	富集系数 BCF	2.58	0.73	0.69	0.26	1.59
	转移系数 TF	1.27	0.29	0.12	0.24	0.84
Cr	上部 Up/(mg·kg ⁻¹)	9.22	1.93	1.60	0.99	0.53
	下部 Down/(mg·kg ⁻¹)	2.68	2.63	2.90	9.08	0.73
	富集系数 BCF	1.59	0.72	1.55	0.56	0.37
	转移系数 TF	3.45	0.73	0.55	0.11	0.73
Cu	上部 Up/(mg·kg ⁻¹)	24.3	8.36	7.00	2.30	3.16
	下部 Down/(mg·kg ⁻¹)	31.0	30.6	15.6	7.88	9.03
	富集系数 BCF	0.86	0.51	0.93	0.47	0.43
	转移系数 TF	0.78	0.27	0.45	0.29	0.35
Pb	上部 Up/(mg·kg ⁻¹)	26.9	8.94	7.55	4.43	4.16
	下部 Down/(mg·kg ⁻¹)	25.3	31.6	19.8	19.3	11.7
	富集系数 BCF	0.75	0.50	0.62	0.49	0.44
	转移系数 TF	1.06	0.28	0.38	0.23	0.36
Zn	上部 Up/(mg·kg ⁻¹)	102	21.9	15.1	5.28	7.55
	下部 Down/(mg·kg ⁻¹)	99.1	61.6	54.6	22.6	12.2
	富集系数 BCF	2.11	0.76	0.74	0.47	0.57
	转移系数 TF	1.03	0.36	0.28	0.23	0.62

由表 3 可知,重金属在不同菊花植株内含量不同,且有地上部分小于地下部分趋势.金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊中 Cd 的整株均值分别是 0.71、0.16、0.21、0.04、0.20 mg·kg⁻¹,从大到小的排序为金皇后>粉旭桃>墨菊>玛格丽特菊>孔雀草,金皇后含量最高,地上部分为 0.73 mg·kg⁻¹,地下部分为 0.58 mg·kg⁻¹.

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊中 Cr 的整株均值分别是 8.50、2.07、1.83、2.26、0.58 mg·kg⁻¹,按照从大到小的排序为金皇后 > 孔雀草 > 墨菊 > 粉旭桃 > 玛格丽特菊,金皇后含量最高,地上部分为 9.22 mg·kg⁻¹,地下部分为 2.68 mg·kg⁻¹.

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊中 Cu 的整株均值分别是 25.0、13.06、8.48、3.18、4.60 mg·kg⁻¹,按照从大到小的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 玛格丽特菊 > 孔雀草,金皇后含量最高,地上部分为 24.3 mg·kg⁻¹,地下部分为 31.0 mg·kg⁻¹.

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊中 Pb 的整株均值分别是 26.8、13.7、9.67、6.77、6.01 mg·kg⁻¹,按照从大到小的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草 > 玛格丽特菊,金皇后含量最高,地上部分为 26.9 mg·kg⁻¹,地下部分为 25.3 mg·kg⁻¹.

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊中 Zn 的整株均值分别是 102、30.0、22.0、8.00、8.70 mg·kg⁻¹,按照从大到小的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草 > 玛格丽特菊,金皇后含量最高,地上部分为 102 mg·kg⁻¹,地下部分为 99.1 mg·kg⁻¹.

2.3.2 富集与转移系数的分析

由表 3 可知,金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊对 Cd 的富集系数分别是 2.58、0.73、0.69、

0.26、1.59,按照从大到小的排序为金皇后 > 玛格丽特菊 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草,其中,金皇后的富集能力最强,孔雀草的富集能力最弱;对 Cd 的转移系数分别是 1.27、0.29、0.12、0.24、0.84,按照从大到小的排序为金皇后 > 玛格丽特菊 > 墨菊 > 孔雀草 > 粉旭桃。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊对 Cr 的富集系数分别是 1.59、0.72、1.55、0.56、0.37,按照从大到小的排序为金皇后 > 粉旭桃 > 墨菊 > 孔雀草 > 玛格丽特菊,其中,金皇后的富集能力最强,玛格丽特菊的富集能力最弱;对 Cr 的转移系数分别是 3.45、0.73、0.55、0.11、0.73,按照从大到小的排序为金皇后 > 墨菊 > 玛格丽特菊 > 粉旭桃 > 孔雀草。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊对 Cu 的富集系数分别是 0.86、0.51、0.93、0.47、0.43,按照从大到小的排序为粉旭桃 > 金皇后 > 墨菊 > 孔雀草 > 玛格丽特菊,其中,粉旭桃的富集能力最强,玛格丽特菊的富集能力最弱;对 Cu 的转移系数分别是 0.78、0.27、0.45、0.29、0.35,按照从大到小的排序为金皇后 > 粉旭桃 > 玛格丽特菊 > 孔雀草 > 墨菊。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊对 Pb 的富集系数分别是 0.75、0.50、0.62、0.49、0.44,按照从大到小的排序为金皇后 > 粉旭桃 > 墨菊 > 孔雀草 > 玛格丽特菊,其中,粉旭桃的金皇后能力最强,玛格丽特菊的富集能力最弱;对 Pb 的转移系数分别是 1.06、0.28、0.38、0.23、0.36,按照从大到小的排序为金皇后 > 粉旭桃 > 玛格丽特菊 > 墨菊 > 孔雀草。

金皇后、墨菊、粉旭桃、孔雀草、玛格丽特菊对 Zn 的富集系数分别是 2.11、0.76、0.74、0.47、0.57,按照从大到小的排序为金皇后 > 墨菊 > 粉旭桃 > 玛格丽特菊 > 孔雀草,其中,金皇后的富集能力最强,玛格丽特菊的富集能力最弱;对 Zn 的转移系数分别是 1.03、0.36、0.28、0.23、0.62,按照从大到小的排序为金皇后 > 玛格丽特菊 > 墨菊 > 粉旭桃 > 孔雀草。

2.3.3 金皇后不同部位重金属富集系数的分析

由以上可知,5 种菊花对土壤均有修复能力,以对 5 种重金属转移系数均为最高的金皇后为例,对菊花不同部位的重金属富集系数与含量比较.金皇后的根际土壤中,重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的含量分别为 0.28、5.35、29.0、35.7、48.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,金皇后中,重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的含量分别为 0.71、8.50、5.04、26.8、102 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中对 Cd 的富集能力最强,对 Pb 的富集能力最弱.针对金皇后的不同部位而言,由图 1 可知,根对 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的富集系数分别为 2.09、0.50、1.07、0.71、2.05,其从大到小的排序为 Cd > Zn > Cu > Pb > Cr;茎对 5 种重金属的富集系数分别为 0.47、0.22、0.08、0.13、0.28,其从大到小的排序为 Cd > Zn > Cr > Pb > Cu;叶对 5 种重金属的富集系数分别为 0.55、0.04、0.03、0.03、0.04,其从大到小的排序为 Cd > Cr > Zn > Pb > Cu;花对 5 种重金属的富集系数分别为 1.63、1.05、0.65、0.46、1.63,其从大到小的排序为 Zn > Cd > Cr > Cu > Pb.综上所述,金皇后的根对 4 种重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 的富集能力要高于金皇后的花、叶、枝,金皇后对 Cd 的富集能力最强,对 Pb 的富集能力最弱。

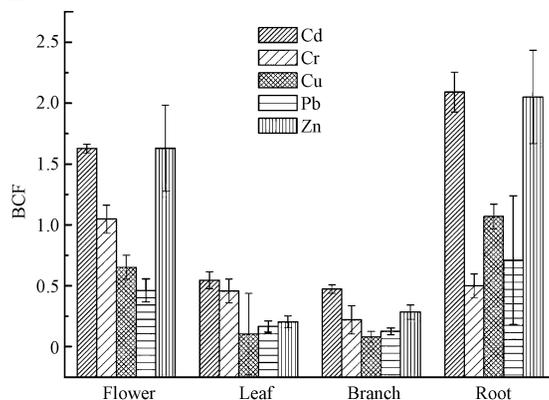


图 1 金皇后不同部位的重金属富集系数比较

Fig.1 Comparison of heavy metal enrichment coefficient in different places of *Chrysanthemum morifolium*

2.3.4 土壤与菊花重金属相关性分析

运用统计软件 SPSS 对重金属元素进行相关性分析,即可得到土壤重金属与菊花重金属相关性系数

(相关程度的度量采用 Pearson 相关系数),土壤中 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 与菊花各重金属相关的相关系数分别为 0.93^{**}、0.60、0.91^{**}、0.91^{**}、0.93^{**},由此说明土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 与菊花中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 在 0.01 概率水平下呈极显著性正相关,土壤中 Cr 与菊花中 Cr 含量呈正相关,土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 含量越高,菊花中 Cd、Cu、Pb、Zn 含量同样也越高。

2.4 菊花的环境效益分析

为分析中国开封菊花花会带来的环境效益,进行了菊花释水量、日滞尘量、日固碳量、日释氧量的分析,依据释水量、日滞尘量、日固碳量、日释氧量的数据和公式(5)~(10)进行计算,结果见表 4。2016—2018 年开封市菊花花会展览菊花盆数分别为 260、295、279 万盆,菊展期间菊花释水量分别为 2.60×10^3 、 2.95×10^3 、 2.79×10^3 t,日滞尘量分别为 0.64、0.73、0.69 t,日固碳量分别为 20.7、23.5、22.2 t,日释氧量分别为 15.1、17.1、16.1 t,其环境效益,随着菊花的增多而增强。

表 4 开封市菊花的环境效益

Table 4 Environmental Benefits of Chrysanthemum in Kaifeng City

年份 Years	菊花 Chrysanthemum/万盆	释水量 Discharge of water/t	日滞尘量 Daily dust retention/t	日固碳量 Daily fixed carbon dioxide content/t	日释氧量 Daily amount of oxygen released/t
2016 年	260	2.60×10^3	0.64	20.7	15.1
2017 年	295	2.95×10^3	0.73	23.5	17.1
2018 年	279	2.79×10^3	0.69	22.2	16.1

分析中国开封菊花花会带来的环境效益,进行了菊花释水量、滞尘量、固碳量、释氧量的分析,由表 5 可知,开封市的日降尘量为 $4244.5 \text{ t}^{[29]}$,2016—2018 年开封市菊花日滞尘量贡献率分别为 0.15‰、0.17‰、0.16‰,2017 年种植菊花最多,其贡献率也最高。菊花在进行光合作用的过程中,会生成一部分水,蒸发并释放到周围的大气环境中。

表 5 菊展期间菊花的环境效益

Table 5 Environmental benefits of chrysanthemum during Chrysanthemum exhibition

	年份 Year		
	2016 年	2017 年	2018 年
开封市滞尘量 The amount of dust in Kaifeng City/t	4245	4245	4245
滞尘量贡献率 Dust retention contribution rate/%	0.015	0.017	0.016
开封市人口 Kaifeng City population/(万人)	519	521	523
开封市花期相对湿度均值 Mean value of relative humidity at flowering stage in Kaifeng City/%		49.8	
开封市空气含水量 Kaifeng City air water content/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)		11.5	
人均日吸入氧气量 Per capita daily inhaled oxygen content/kg		0.75	
人均日呼出二氧化碳量 Per capita daily exhaled carbon dioxide content/kg		0.90	
开封市人口需 O_2 量 The daily oxygen demand of Kaifeng City/t	3893	3910	3925
开封市人口释放 CO_2 量 The amount of carbon dioxide released by the population of Kaifeng City/t	4671	4691.88	4710.33
释氧量贡献率 Oxygen release rate/%	0.39	0.44	0.41
固碳量贡献率 Carbon contribution rate/%	0.32	0.36	0.34

菊花通过光合作用,吸收空气中的 CO_2 释放出 O_2 。2016—2018 年开封市人口分别为 519 万人、521 万人、523 万人^[30],按照常规人均日吸入氧气量 0.75 kg 进行计算,人口 O_2 日呼吸总量分别为 3893、

3910、3925 t,其贡献率为 0.39%、0.44%、0.41%,分别可以满足 2.76 万人、3.13 万人、2.96 万人口的呼吸。其中 2017 年菊花种植最多,其贡献率亦最高。

人口吸入空气中的 O_2 ,释放出 CO_2 。2016—2018 年开封市人口分别为 519 万人、521 万人、523 万人,按照常规人均日呼出 CO_2 量 0.90 kg 进行计算,人口呼出 CO_2 总量分别为 4671、4692、4710 t,依据前面所计算得到的结果进行计算,得到菊花日固碳量贡献率分别为 0.32%、0.36%、0.34%,分别可以消耗 1.59 万人、1.80 万人、1.70 万人释放的 CO_2 的量。

观赏性植物应用在绿地建设中,健全城市生态环境、美化城市面貌,且能营造芳香氛围,提升城市的整体环境质量。本研究所选金皇后、墨菊、孔雀草、粉旭桃、玛格丽特菊对 5 种重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 的富集能力研究中,多数都体现出普通杂草植物所具有的一般特征,即植物地下部分的重金属富集能力大于地上部分,不具备超富集植物的一般特征^[31]。本研究观赏性菊花对 5 种重金属的富集能力与金文芬等^[32]园林植物对重金属 Mn、Zn、Cu、Ni、Cd、Pb 均有富集能力相一致。菊花具有空气净化的作用,菊花叶片通过滞尘作用而降低空气中的灰尘含量,通过对大气污染物的吸收、降解、转化或同化起到净化大气的作用;通过光合作用,实现城市环境中的碳氧平衡,通过植物体遮阴反射、表面气孔的蒸腾作用,实现降温增湿,但菊花滞尘会阻碍植物的呼吸与光合作用,且滞尘中也有可能含有重金属,所以菊花修复重金属的能力有可能受菊花释氧固碳量与滞尘量影响。

本研究选取开封当地市花菊花金皇后、墨菊、孔雀草、粉旭桃、玛格丽特菊作为研究对象,菊花生物量大,开封菊花花会 2016 年游客约 5080 万人,旅游带来的经济效益为 397 亿元;2017 年游客约 5863 万人,旅游带来的经济效益为 783 亿元^[30],菊花的种植推动开封市旅游业的发展,且开封市菊展结束,菊花土壤回收利用,菊花秸秆用于垃圾发电,1 吨生物质燃料的能量相当于 0.47 吨标准煤^[33],具有可观的经济与环境效益,观赏性植物不会进入食物链,降低了对人体的危害,适合大面积推广,但特定观赏性植物富集某种特征重金属需要进行继续研究。

3 结论 (Conclusion)

(1) 土壤中 5 种重金属从大到小的顺序为 $Zn > Pb > Cu > Cr > Cd$,5 种重金属属于中等变异,土壤中 Cd 轻度污染状态,其余重金属处于无污染状态,土壤综合处于轻度污染状态。

(2) 富集能力方面,5 种菊花对 5 种重金属均有修复能力,其中金皇后对 Cd、Zn 的富集效果最好,粉旭桃对 Cr、Cu、Pb 的富集效果最佳;转移能力方面,金皇后的转移重金属能力最强,其由强到弱的排序为 $Cr > Cd > Pb > Zn > Cu$;对转移效果为优的金皇后分析,得出金皇后的根对 4 种重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 的富集能力高于金皇后的枝、叶、花。

(3) 土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 与菊花中 Cd、Cu、Pb、Zn 在呈极显著性正相关,土壤中 Cr 与菊花中 Cr 含量呈正相关。

(4) 环境效益分析,以开封菊花为例,2016—2018 年开封菊花日滞尘量、日释氧量、日固碳量分、菊花释水量等环境效益,随着菊花的增多而增强。

参考文献 (References)

- [1] 解晓露,袁鑫,朱晓龙,等.中碱性镉污染农田原位钝化修复材料研究进展[J].土壤通报,2018,49(5):1254-1260.
XIE X L, YUAN C, ZHU X L, et al. In-situ passivation remediation materials in cadmium contaminated alkaline agricultural soil: A review [J]. Soil Notification 2018, 49(05): 1254-1260 (in Chinese).
- [2] 欧阳林男,吴晓芙,李芸,等.锰矿修复区泡桐与栎树生长与重金属积累特性[J].中国环境科学,2016,36(3):908-916.
OUYANG L N, WU X F, LI Y, et al. Growth and heavy metal accumulation of *Paulownia fortunei* and *Koelreuteria bipinnata* in an ecological restoration site of the manganese-ore tailing [J]. China Environmental Science, 2016, 36(3): 908-916 (in Chinese).
- [3] 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,等.3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响[J].环境科学,2016,37(1):301-308.
PENG X Z, YANG S X, LI F M, et al. Effects of three industrial organic wastes as amendments on plant growth and the biochemical properties of a Pb/Zn mine tailings [J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 301-308 (in Chinese).
- [4] 孙雪娇,常顺利,张毓涛,等.矿区道路两侧雪岭云杉叶片重金属富集效应[J].生态学报,2018,38(9):3155-3164.

- SUN X J, CHANG S L, ZHANG Y T, et al. Accumulation of heavy metals in *Picea schrenkiana* leaves growing on roadsides in a mining area [J]. *Journal of Ecology*, 2018, 38(9): 3155-3164 (in Chinese).
- [5] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 芦竹、木本植物间种修复重金属污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5207-5216.
ZENG P, GUO Z H, XIAO X Y, et al. Intercropping arundo donax with woody plants to remediate heavy metal-contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5207-5216 (in Chinese).
- [6] 谷阳光, 高富代. 我国省会城市土壤重金属含量分布与健康风险评价[J]. *环境化学*, 2017, 36(1): 62-71.
GU Y G, GAO F D. Spatial distribution and health risk assessment of heavy metals in provincial capital cities, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(1): 62-71 (in Chinese).
- [7] 弋良朋, 王祖伟. 施用污泥对油菜根际养分和不同种类重金属的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(20): 6855-6862.
YI L P, WANG Z W. Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for rape grown in soil amended with sludge [J]. *Journal of Ecology*, 2017, 37(20): 6855-6862 (in Chinese).
- [8] 周涵君, 马静, 韩秋静, 等. 施用生物炭对土壤 Cd 形态转化及烤烟吸收 Cd 的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9): 3730-3738.
ZHOU H J, MA J, HAN Q J, et al. Effects of biochar addition on the soil Cd fraction and the absorption of Cd by tobacco [J]. *Journal of Environmental Science*, 2018, 38(9): 3730-3738 (in Chinese).
- [9] CHABUKDHARA MAYURI, NEMA A K. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: Probabilistic health risk approach [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 87(1): 57-64.
- [10] 牛明芬, 胡思雨, 史奕, 等. 农业土壤重金属污染原位修复技术[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(4): 439-448.
LIU M F, HU S Y, SHI Y, et al. Advances of in-situ remediation for heavy metal pollution in agricultural soils [J]. *Soil and Crop*, 2018, 7(4): 439-448 (in Chinese).
- [11] 刘平, 仇广乐, 商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展[J]. *生态学杂志*, 2007, 27(6): 933-937.
LIU P, QIU G L, SHANG L H. Phytoremediation of mercury contaminated soil: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 27(6): 933-937 (in Chinese).
- [12] 杨晶媛, 和丽萍. 土壤重金属污染的修复技术研究及进展[J]. *环境科学导刊*, 2014, 33(2): 87-91.
YANG J Y, HE L P. Progress on the research of remediation technology of soil contaminated by heavy metals [J]. *Environmental Science Guide*, 2014, 33(2): 87-91 (in Chinese).
- [13] KUMAR P, MANDAL B, DWIVEDI P. Heavy metals scavenging of soils and sludges by ornamental plants [J]. *The Journal of Applied Horticulture*, 2011, 13, (2): 144-146.
- [14] 方松林. 不同园林植物对土壤重金属的吸收及修复效应[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(14): 210-214, 222.
FANG S L. Effects of different garden plants on heavy metal absorption and remediation of soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(14): 210-214, 222 (in Chinese).
- [15] 崔爽, 刘艺芸, 孙秀菊, 等. 花卉对铅污染土壤的修复[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(9): 2017-2018.
CUI S, LIU Y ZH, SUN X J, et al. Remedying Pb-contaminated soil by ornamental flowers [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(9): 2017-2018 (in Chinese).
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
LU R K. Soil agrochemistry analysis protocols [M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 1999 (in Chinese).
- [17] 李涛. 煤矿周边土壤-农作物重金属污染特征及风险评价 [D]. 开封: 河南大学, 2017.
LI T. Pollution characteristics and risk assessment of soil-crop heavy metals in coal mines [D]. Kaifeng: Henan University, 2017 (in Chinese).
- [18] 姜玉玲, 阮心玲, 杨玲, 等. 开封市城市土壤剖面 Hg、As 和 Sb 分布特征分析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(5): 1036-1046.
JIANG Y L, RUAN X L, YANG L, et al. Distribution of Hg, As and Sb concentrations in urban soil profiles of Kaifeng City, Henan Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(5): 1036-1046 (in Chinese).
- [19] BERNALTE E, MARN S C, PINILLA G E. High-throughput mercury monitoring in indoor dust microsamples by bath ultrasonic extraction and anodic stripping voltammetry on gold nanoparticles-modified screen-printed electrodes [J]. *Electroanalysis*, 2013, 25(1): 289-294.
- [20] 陆金, 赵兴青. 铜陵狮子山矿区土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2017, 36(9): 1958-1967.
LU J, ZHAO X Q. Characteristics and ecological risk assessment of polluted soil by heavy metals in Shizishan, Tongling [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(9): 1958-1967 (in Chinese).
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
China Environmental Monitoring Terminus. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese).
- [22] 刘丹, 赵永红, 周丹, 等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1556-1567.
LIU D, ZHAO Y H, ZHOU D, et al. Ecological risk assessment of heavy metals pollution in a tungsten mine soil in south of Jiangxi Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(7): 1556-1567 (in Chinese).
- [23] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力 [J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2453-2459.

- ZHANG Y X, SONG B, BIN J, et al. Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2019,40(5):2453-2459(in Chinese).
- [24] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Nature Biotechnology*, 1995,13(5):468-474.
- [25] 刘洋洋,杨悦,王倩,等.苏州西山仰坞生态园城市半自然生态系统服务功能与价值的定量评估[J]. *生态科学*,2019,38(3):116-124.
- LIU Y Y, YANG Y, WANG Q, et al. Quantitative assessment of ecosystem service value of the Yangwu ecological park in Xishan, Suzhou [J]. *Ecological Science*,2019,38(3):116-124(in Chinese).
- [26] 刘雪莲,何云玲,张淑洁,等.昆明市常见绿化植物冬季固碳释氧能力研究[J]. *生态环境学报*,2016,25(8):1327-1335.
- LIU X L, HE Y L, ZHANG S J, et al. Study on carbon fixation and oxygen release capabilities of 18 afforestation plants in Kunming City [J]. *Journal of Ecology and Environment*,2016,25(8):1327-1335(in Chinese).
- [27] 杨周敏.西安市区不同绿化植物的滞尘效应季节变化研究[J]. *水土保持研究*,2015,22(4):178-183,188.
- YANG Z M, Study on seasonal dust retention capacity of different green plants in Xi'an City[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2015,22(4):178-183,188(in Chinese).
- [28] 王俊帅,韩来鹏,马腾,等.哈尔滨3种木本植物的光合蒸腾作用特性研究[J]. *天津农业科学*,2015,21(8):120-123.
- WANG J S, HAN LP, MA T, et al. Study on photosynthesis-transpiration characteristics of three woody plant species in Harbin [J]. *Tianjin Agricultural Science*,2015,21(8):120-123(in Chinese).
- [29] 王蕾,哈斯,刘连友.中国主要城市 TSP 浓度、降尘量时空分布特征[C]//中国地理学会 2006 年学术年会论文摘要集.兰州:中国地理学会,2006.
- WANG L, HA S, LIU L Y. Temporal and spatial distribution characteristics of TSP concentration and dustfall in major cities of China [C]//Abstract Collection of Papers of the 2006 Annual Meeting of the Chinese Geographical Society. Lanzhou: Geographical Society of China,2006(in Chinese).
- [30] 开封市统计局.开封统计年鉴[M].开封:开封统计出版社,2016-2018.
- Kaifeng City Statistics Bureau. *Kaifeng Statistical Yearbook* [M]. Kaifeng: Kaifeng Statistics Press,2016-2018(in Chinese).
- [31] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社,2008:97-98.
- WU W H. *Plant physiology* [M]. Beijing: Science Press,2008:97-98(in Chinese).
- [32] 金文芬,方晰,唐志娟.3种园林植物对土壤重金属的吸收富集特征[J]. *中南林业科技大学学报*,2009,29(3):21-25.
- JIN W F, FANG X, TANG Z J. Absorption and accumulation characteristics of 3 ornamental plants to soil heavy metals [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*,2009,29(3):21-25(in Chinese).
- [33] 杨修飞,黄蕾,徐玉梅,等.我国南方地区几种常见生物质材料的热值测定[J]. *节能*,2017,36(8):27-29,2.
- YANG X F, HUANG L, XU Y M, et al. The measurement of calorific values to several kinds of biomass common materials in Southern China [J]. *Energy Saving*,2017,36(8):27-29,2(in Chinese).