

香石竹设施栽培土壤可溶性盐分主成分分析^①

官会林¹, 孙世中¹, 郭云周², 杨泮川³, 洪丽芳²

(1 云南师范大学能源与环境科学学院, 昆明 650092; 2 云南省农科院农业资源与环境研究所, 昆明 650205;

3 云南英茂花卉产业有限公司, 昆明 650228)

摘要: 为探索香石竹设施栽培土壤盐害的防治方法与技术途径, 对香石竹设施栽培土壤可溶性盐分进行了主成分分析。结果表明: 土壤中可溶性盐分可分为主成分 1 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 K^+) 和主成分 2 (CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) 两个成分, 主成分 1 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 与土壤 EC 值三次模型拟合度较高 ($R^2 > 0.850^{**}$), 并与土壤 EC 值呈不同强度的正相关性; 土壤 EC 值与全盐量呈强正相关性 ($r = 0.99^{**}$), 并接近线性关系 (线性模型 $R^2 = 0.976^{**}$, 三次模型 $R^2 = 0.984^{**}$); 土壤 EC 值可作为一个有效指标, 反映土壤盐渍化及土壤可溶性盐分, 特别是反映 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 的变动情况, 盐害防治重点在于 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 。研究对指导香石竹设施栽培土壤管理与持续利用具有重要意义。

关键词: 香石竹; 土壤盐害; 可溶性盐分; 主成分分析

中图分类号: S512

香石竹 (*Dianthus caryophyllus* L.), 又名康乃馨 (*Carnation*), 属石竹科石竹属的多年生草本植物, 为世界四大切花之一, 在国际花卉市场中占有重要地位。云南滇池环湖地区是国内较大规模的香石竹生产种植基地, 随着设施种植年限延长, 农药化肥施用量加大, 导致栽培土壤盐害日益突出, 病害严重, 成为制约香石竹产业持续发展及农业生态环境建设的重要屏障^[1]。

设施农业土壤盐渍化是目前世界农业面临的主要环境问题之一, 导致土壤盐害的可溶性盐分较多, 其土壤盐分组成及其盐渍化程度受施肥品种、施肥水平、灌溉水质及栽培作物品种等多种因素影响而存在较大的差异性。关于此方面的研究国内外已有较多的研究报道^[2-9], 但针对香石竹设施栽培土壤盐渍化方面研究报道甚少。因此, 专题组调查研究了云南主要产区土壤可溶性盐分状况, 通过主成分分析等统计分析方法, 深入了解土壤中可溶性盐分组成及其与全盐量、土壤电导率 (EC) 值的关系, 查找导致土壤盐害的主要成分, 为高原生态区香石竹栽培土壤持续利用管理及其土壤盐害防治提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤基本情况及样品采集

土壤样品于 2009 年 5 月 21 至 22 日采集于滇池环湖区的晋宁安江香石竹种植基地。区域海拔 1 880 ~ 1 900 m, 年均温 14.7℃, 平均降雨量约 970 mm, 降雨集中于夏季, 冬春季节干旱少雨, 表土层盐分富集突出, 区域耕作土壤 pH 5.5 ~ 6.2, 土壤体积质量 1.3 ~ 1.4 g/cm³, 质地黏重, 土壤有机质含量 50 ~ 60 g/kg, 碱解 N 含量 150 ~ 200 mg/kg, 速效 P 含量 30 ~ 35 mg/kg, 速效 K 含量 100 ~ 150 mg/kg。因此, 种植区土壤有机质含量及主要养分指标均属于丰富至极丰富水平, 但土壤酸化、土壤体积质量过高、物理性质差等障碍因素突出。研究选择了连续种植香石竹 5 年以上、土壤盐害严重、苗期致死率达 40% 以上的 10 个大棚区的土壤为研究对象。每个大棚区按蛇形法与交叉法相结合采集 15 ~ 20 个土样点, 采集层次为 0 ~ 20 cm 耕层土壤, 四分法取舍, 共采集 17 个综合分析样 (约 180 个采样点), 装入样品袋编号备用。

1.2 测定方法

可溶性盐分测定: 将采回来的土壤样品置于室内通风阴干, 磨细后过 100 目筛孔, 取 50 g 风干土, 放入 500 ml 三角瓶中, 加去离子蒸馏水 250 ml, 盖好瓶塞, 在振荡机上振荡 3 min, 抽气过滤制备待测液。 Ca^{2+} 用 0.01 mol/L 的 EDTA 二钠盐滴定法测定; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 用双指示剂滴定法测定; Cl^- 用 0.025 mol/L 的

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40861019) 和国家水体污染控制与治理专项项目 (2009ZX07102-004) 资助。

作者简介: 官会林 (1964—), 男, 云南昆明人, 教授, 主要从事农业生物环境与水土工程的研究和教学工作。E-mail: ghl0871@yahoo.com.cn

AgNO₃ 滴定, NO₃⁻ 用酚二磺酸比色法测定; SO₄²⁻ 用 EDTA 间接络合滴定, K⁺ 用火焰光度计测定, 全盐量用烘干法测定, 土壤 EC 值用 LF91 型电导率仪测定 [10-11]。

1.3 数据分析

数据用 SPSS Statistics 17.0 及 Excel 进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤可溶性盐分、全盐量与 EC 值

土壤综合样品测定数据表明, 土壤中可溶性盐分主要是 SO₄²⁻、NO₃⁻、Ca²⁺、Cl⁻、K⁺ 以及少量的 CO₃²⁻、

HCO₃⁻ 等, 说明香石竹设施栽培表土层富集的可溶性盐分主要是硫酸盐、硝酸盐、钙盐以及少量卤盐 (表 1), 并由此引起表层土壤次生盐渍化。这些盐分主要来源于施肥及畜牧养殖小区污水灌溉。SO₄²⁻ 是肥料品种 K₂SO₄、(NH₄)₂SO₄ 和普通过磷酸钙中的成分。NO₃⁻ 除本身为肥料中有效成分外, 尚可由施入土中的 NH₄⁺ 转化而来 [12]; 另外来源于养殖小区高 N 量污水长期灌溉, 形成土壤 N 素富集, N 素在土壤中经过一系列的转化而形成 NO₃⁻-N [7]。Cl⁻ 为肥料品种 KCl 及 NH₄Cl 中重要成分。CO₃²⁻、HCO₃⁻ 与 Ca²⁺ 主要是施用钙肥及施用生石灰进行土壤消毒处理引起。

表 1 香石竹设施栽培土壤可溶性盐分、全盐量及 EC 值

Table 1 Soluble salt, total salt, and EC values in carnation facilities cultivation soil

CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	全盐量	EC 值
0.25 ± 0.03	0.30 ± 0.04	0.07 ± 0.01	1.60 ± 0.37	1.74 ± 0.37	0.61 ± 0.15	0.42 ± 0.11	5.29 ± 1.03	3.09 ± 0.65

注: CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Ca²⁺, K⁺, 全盐量单位为 g/kg; EC 值单位为 mS/cm。

2.2 土壤可溶性盐分的主成分分析

土壤中可溶性盐分较多, 为了深入认识这些盐分的性质和相互关系, 对土壤中可溶性盐分做主成分分析。

2.2.1 数据适合度检验 判断数据是否适合做主成分分析, 可采用 KMO 检验及球形度检验。

KMO 统计量采用下式计算:

$$KMO = \frac{\sum_{j \neq i} \gamma_{ij}^2}{\sum_{j \neq i} \gamma_{ij}^2 + \sum_{j \neq i} p_{ij}^2} \quad (1)$$

式中, γ_{ij} 是变量 x_i 和其他变量 $x_j (j \neq i)$ 间的简单相关系数, p_{ij} 是变量 x_i 和其他变量 $x_j (j \neq i)$ 间在控制了其他变量下的偏相关系数。KMO 值在 0 ~ 1 之间, 越接近 1, 主成分分析效果越好, 小于 0.5, 不适合做主成分分析。计算结果得出, KMO 统计量为 0.7, 表明偏相关性较弱, 变量间共同因素多; Bartlett 的球形度检验, 近似卡方为 87.65, $p < 0.01$, 表明拒绝单位相关阵的原假设, 原始变量相关系数矩阵有共同因素存在。两项检验指标均说明, 数据适合于主成分分析。

2.2.2 成分的提取 确定成分个数的标准主要有累计方差贡献率、特征值和碎石图 3 类。

前 k 个累计方差贡献率根据下式计算:

$$c_k = \frac{\sum_{i=1}^k V_k}{P} = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (2)$$

式中, p 表示总的方差。通常选取累计方差贡献率大于 0.85 时的特征值个数为成分个数 k 。据此计算得出的总方差表中 (表 2), 前两种成分的特征值分别为 4.28 和 1.53, 累计方差贡献率为 83.06%。以特征值和累计方差贡献率两项指标可确定两个成分。从碎石图 (图 1) 来看, 也应该选取这两个成分。碎石图是按照因数提取顺序, 反映因素特征值随因数个数变化的分布图, 一般而言, 曲线开始变为平缓的前一个点可认为是提取的最大因数个数。从主成分分析得出的碎石图来看, 变为平缓的前一个点为 2, 也可确定这两个成分。

表 2 土壤可溶性盐分主成分特征根和方差贡献率

Table 2 Eigenvalue and total variance of principal component analysis of soil soluble salt contents

分析项目	主成分 1	主成分 2
特征值	4.28	1.53
方差贡献率 (%)	61.16	21.90
累计方差贡献率 (%)	61.16	83.06

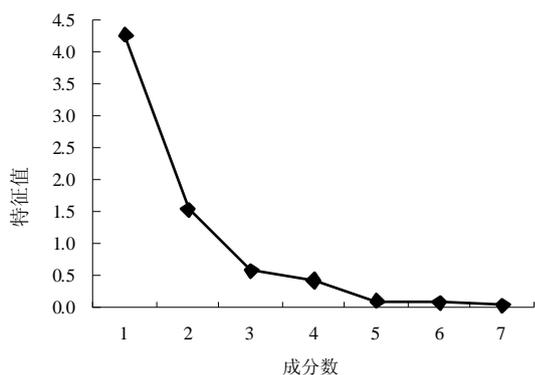


图 1 主成分分析碎石图

Fig. 1 Scree plot of principal component analysis

表 3 土壤可溶性盐分主成分分析成分矩阵

Table 3 Component matrix in principal component analysis of soil soluble salt contents

土壤盐分	成分矩阵		成分得分系数矩阵	
	主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2
Ca ²⁺	0.97		-0.03	0.56
SO ₄ ²⁻	0.95		-0.03	0.54
K ⁺	0.95		0.20	-0.05
NO ₃ ⁻	0.89		0.23	-0.04
Cl ⁻	0.85		0.20	0.18
CO ₃ ²⁻		0.86	0.23	-0.03
HCO ₃ ⁻		0.83	0.23	-0.08

2.2.3 成分的解释 从成分矩阵（表 3）看出，对土壤全盐量和土壤 EC 值影响较大的土壤可溶性盐分中对成分 1 贡献最大的是 CO₃²⁻，得分系数为 0.23，其次为 HCO₃⁻，得分系数为 0.23，这两种盐分在土壤中主要来源于作为肥料用的碳酸钙或消毒用的生石灰；对成分 2 贡献最大的是 Ca²⁺，得分系数为 0.56，其次为 SO₄²⁻，得分系数为 0.54，这几种可溶性盐分主要来源于施肥影响。

2.3 土壤可溶性盐分与全盐量、EC 值的相关分析

对土壤 EC 值、全盐量和可溶性盐分进行相关性分析表明(表 4): Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、K⁺ 之间均有一定的相关性，与土壤 EC 值和全盐量均有极显著的不同强度的正相关性，土壤 EC 值与全盐量具有极显著强正相关性 (r = 0.99)。葛菁萍等^[13-16]也有相似的研究结果。但 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 与土壤 EC 值和全盐量均无显著相关性。

表 4 香石竹设施栽培土壤可溶性盐分与全盐量、EC 值相关分析矩阵

Table 4 Correlation matrix of soluble salt, total salt and EC values in soil of carnation facilities cultivation

	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	全盐量
HCO ₃ ⁻	0.45							
Cl ⁻	0.03	0.02						
SO ₄ ²⁻	-0.03	0.07	0.85**					
NO ₃ ⁻	0.33	0.21	0.58*	0.78**				
Ca ²⁺	0.05	0.01	0.79**	0.91**	0.84**			
K ⁺	0.-05	-0.05	0.72**	0.87**	0.86**	0.93**		
全盐量	0.13	0.14	0.79**	0.95**	0.93**	0.94**	0.91**	
EC 值	0.20	0.15	0.79**	0.94**	0.93**	0.91**	0.89**	0.99**

注：Pearson 相关性；**表示在 p<0.01 水平上显著相关；*表示在 p<0.05 水平显著相关，下表同。

2.4 土壤全盐量、可溶性盐分与土壤 EC 值的曲线估计

根据主成分分析确定的成分 1 中的各种可溶性盐分，未能明确对土壤 EC 值的具体相关性，为此作了土壤全盐量和成分 1 中可溶性盐分与土壤 EC 值的曲线估计(表 5)。曲线拟合结果表明，各种拟合模型中，Cl⁻、K⁺ 与土壤 EC 值的拟合度均较低，SO₄²⁻、NO₃⁻、

Ca²⁺ 的三次模型拟合度均显著高于 0.850 (R²)，表明这 3 种可溶性盐分与土壤 EC 值具有更为密切的关系。土壤全盐量与土壤 EC 值的线性模型拟合度 R² 为 0.976，三次模型拟合度 R² 为 0.984，两种模型均为极显著 (p<0.01)，表明土壤全盐量与土壤 EC 值接近于线性关系。因此，香石竹设施栽培可以用土壤 EC 值来表征土壤全盐含量及盐渍化程度，土壤 EC 值的变

化也反映了土壤中可溶性盐分浓度,特别是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 的变化情况。同时, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 的变化将灵敏地使土壤全盐量发生明显变化,也使土壤 EC 值发生相应的变化。

表 5 土壤可溶性盐分与 EC 值曲线估计三次模型汇总

Table 5 Cubic model summary of curve estimation of soluble salt content and soil EC values

自变量	模型汇总			参数估计值		
	R^2	F	常数	b1	b2	b3
SO_4^{2-}	0.952**	72.614	-0.231	2.035	0.393	-0.100
NO_3^-	0.869**	24.400	-0.303	3.244	-0.848	0.116
Ca^{2+}	0.924**	44.543	-1.756	14.382	-8.929	2.008
全盐量	0.984**	218.975	-0.931	1.054	-0.057	0.002

3 结论

(1) 云南香石竹设施栽培表土层次生盐渍化主要成分包括硝酸盐、硫酸盐、钙盐、少量卤盐、钾盐及少量碳酸盐。主成分分析表明,土壤中可溶性盐分可分为主成分 1 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 K^+) 和主成分 2 (CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) 两个成分,主成分 2 易于分解;相关性分析看出,这些可溶性盐分与土壤全盐量、土壤 EC 值均有着极显著的正相关性,其中, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 NO_3^- 与土壤全盐量、土壤 EC 值 (K^+ 为 0.887) 的相关性均超过 0.90 以上;土壤全盐量与 EC 值呈极显著强正相关性 ($r = 0.99$, $p < 0.01$),并接近线性关系;土壤 EC 值可反映土壤全盐量和土壤盐渍化程度,特别是反映 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的变动情况。

(2) 从降低或消除盐渍化的角度看,需要对主成分 1 中的可溶性盐分,特别是对 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 重点消减处理,才能有效地降低土壤 EC 值,控制土壤盐渍化发展。这些盐分主要来源于肥料,施肥不当易造成土壤盐害。因此,在生产中应注意施肥的种类,并做到合理用肥及平衡施肥来消减硝酸盐和硫酸盐的危害。研究对指导香石竹设施栽培土壤管理与持续利用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 廖梓良, 官会林, 孙世中, 刘建香, 贾秋鸿, 杨洋川. 设施栽培香石竹根际土壤酶活与土传病害相关性研究. 云南师范大学学报(自然科学版), 2009, 29(3): 59-63
- [2] Mankin KR, Karthikeyan R. Field assessment of saline seep remediation using electromagnetic induction. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 99-107
- [3] Hendrickx JM, Borchers B. Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements: Theory and experimental verification. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 673-685
- [4] Burt CM, Isbell B. Leaching of accumulated soil salinity under drip irrigation. Transactions of the ASAE, 2005, 48(6): 2 115-2 121
- [5] 许福涛. 海口市大棚设施栽培土壤盐分累积特征的研究. 土壤, 2007, 39(5): 829-831
- [6] 王金辉, 柳勇, 徐润生, 吕业成, 胡承孝. 不同施肥水平对耕层土壤盐分迁移和分布的影响. 中国土壤与肥料, 2009(4): 25-29
- [7] 张巍, 冯玉杰. 固氮蓝藻在盐碱化土地生态修复中应用的研究进展. 土壤, 2008, 40(4): 510-516
- [8] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 陈德明. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-65
- [9] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 孙泽强, 刘伟, 董峰, 李克文. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征. 农业工程学报, 2008, 24(6): 59-63
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1980
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 1999
- [12] 李海云, 王秀峰, 邢禹贤. 设施土壤盐分积累及防治措施研究进展. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 535-538
- [13] 葛菁萍, 霍云鹏, 蔡柏岩. 大棚土壤剖面 EC25℃ 值变化研究. 土壤通报, 1999, 30(2): 80-81
- [14] 古丽格娜·哈力木拉提, 海米提·依米提, 阿布都沙拉木·加拉力丁, 热比娅·吐尔逊, 胡小韦. 于田绿洲盐渍化土壤盐分动态变化特征分析. 新疆农业科学, 2008, 45(3): 541-546
- [15] 迟春明, 王志春. 水质和体积质量对碱土饱和和导水率和盐分淋洗的影响. 土壤, 2009, 41(6): 992-997
- [16] 郭全恩, 王益权, 郭天文, 刘军, 南丽丽. 半干旱盐渍化地区果园土壤盐分离子相关性研究. 土壤, 2009, 41(4): 664-669

Principal Component Analysis of Soil Soluble Salt Contents of Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) Facilities Cultivation

GUAN Hui-lin¹, SUN Shi-zhong¹, GUO Yun-zhou², YANG Ban-chuan³, HONG Li-fang²

(1 Institute of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 3 Yunnan Yingmao Flower Industry Co., Ltd., Kunming 650228, China)

Abstract: In order to understand soil salt damage prevention and control technique for carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) facilities cultivation, principal component analysis (PCA) of soil soluble salt contents was taken. The results showed that soil soluble salts could be divided into principal component 1 (SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , K^+) and principal component 2 (CO_3^{2-} , HCO_3^-). SO_4^{2-} , NO_3^- and Ca^{2+} in principal component 1 showed higher degree of cubic model plot fit ($R^2 = 0.850^{**}$), and showed different degrees of positive correlation with soil EC value. Soil EC value was significantly positively correlated ($r = 0.99^{**}$) with soil total salt content and was near linear relationship (linear model $R^2 = 0.976^{**}$, R^2 of cubic model = 0.984^{**}). Soil EC values could be used as an effective indicator to indicate soil salinization and the changes of soil soluble salts, especially SO_4^{2-} , NO_3^- and Ca^{2+} , thus salt damage prevention and treatment should focus on SO_4^{2-} , NO_3^- and Ca^{2+} . This study is of important in guiding the management and sustainable use of carnation facilities cultivation soil.

Key words: *Dianthus caryophyllus* L., Soil salt damage, Soil soluble salt, Principal component analysis