

不同养分条件下太子参根部土壤环境变化及综合评价*

刘帮艳¹ 李金玲^{1,2} 曹国藩^{1†} 郑听¹ 何兵¹ 赵致^{1,2} 王
华磊^{1,2}

(1 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

(2 贵州省药用植物繁育与种植重点(工程)实验室, 贵阳 550025)

摘要 研究不同养分条件下太子参根部土壤环境变化的时间动态, 探索太子参根部土壤环境的综合评价方法, 可为指导太子参高效栽培提供理论基础。于3个不同土壤养分地块上分别种植太子参, 定期监测其根部土壤化学性质、土壤酶活性及微生物种群结构变化, 用主成分分析进行综合评价。结果表明: 太子参整个生长期, 不同土壤养分条件下太子参根部土壤均以全磷、缓效钾、有效磷、速效钾含量以及土壤酸性转化酶(S-AI)和土壤过氧化氢酶(S-CAT)活性变异度最大; 有机质及氮素含量、土壤酸性磷酸酶(S-ACP)、土壤脲酶(S-UE)及土壤多酚氧化酶(S-PPO)活性变异度较小; 太子参成熟后, 细菌和放线菌菌群数量显著增加, 真菌菌群数量显著减少。测定的16个土壤环境指标中较多指标间显著相关, 出现信息重叠, 影响评价结果的客观性; 以基本特征值大于1抽取5个成分, 利用5个成分函数表达式进行综合评分, 结果得出, 各土壤养分含量越高, 综合得分值越大, 土壤环境越优。上述结果说明: 太子参生育期内磷、钾素变化较大, 及时补足磷、钾肥可能是改善太子参根部土壤环境的有效方法之一。利用主成分综合评分方法能客观、高效评价太子参根部土壤环境情况。

关键词 土壤养分; 太子参; 土壤酶; 土壤微生物; 时间动态; 主成分分析

中图分类号 S567.23[†]9; S158

文献标识码 A

土壤环境是作物赖以生存的基本环境, 其物理结构、化学成分、酶活性、微生物种群结构及水、热条件等, 无不作用于作物生长。作为根类药材的太子参, 对土壤环境要求较为严格, 且目前太子参连作对土壤环境也有较大影响, 造成太子参连作障碍问题凸显, 极大影响太子参栽培生产。也有较多研究表明, 烟草、蔬菜以及多数药用植物等因连作而改变土壤环境, 制约自身生产^[1-3]。目前研究将连作障碍主要原因分为三大类: (1) 作物根部化感物质的自毒作用; (2) 土壤微生物结构失衡, 微生物种类减少, 病原微生物增加; (3) 土壤养分亏缺, 造成作物生长不良, 耐、抗性降低。太子参作为广泛药用根类药材, 其产量与品质受连作障碍限制这一问题日益突出^[4]。

土壤养分是土壤肥力重要指标, 土壤养分的亏缺导致土壤肥力退化和作物产量下降, 通过合理施肥调节土壤养分的循环和平衡是提高土壤肥力的主要手段^[5-6]。赵庚星等^[7]研究表明, 耕地利用对土壤养分种类及含量有影响; 李建军等^[8]研究认为, 土壤养分含量及其比例很大程度上决定水稻单产高低和稻田土壤肥力状况。土壤养分不同, 为作物提供养分的能力及对作物消耗养分引起的养分亏缺的缓冲能力也将不同。

目前, 关于太子参根部土壤环境随其生长的动态变化情况鲜见系统研究, 故本研究以不同土壤养分条件下栽培太子参的根部土为研究对象, 从引起连作障碍问题的土壤养分亏缺及微生物结构失衡入手, 于太子参不同生长期测定其根部土壤有机质、碱解氮、全氮、全磷、有效磷、缓效钾、速效钾等化学指标含量及土壤多酚氧化酶、酸性磷酸酶等土壤酶活性与真菌、细菌等微生物群体数量变化, 并进行综合评价, 探究太子参生长过程中根部土壤环境的时间动态变化情况, 综合评价土壤养分对太子参根部土壤环境的影响, 拟为指导太子参高效栽培提供理论支撑。

* 国家自然科学基金项目(31260305)、贵州省作物学重点学科建设项目(黔学位合字 ZDXK[2014]8 号)和贵州省药用植物繁育与种植人才基地(黔人领发[2013]15 号)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.31260305), the Construction Project of Key Discipline on Crop Science in Guizhou Province in China (No. ZDXK[2014]8) and Medicinal Plant Breeding and Cultivation Talent Base of Guizhou Province in China (No.[2013]15)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cgf8933@126.com

作者简介: 刘帮艳(1989—), 女, 贵州独山人, 硕士研究生, 主要从事药用植物栽培与技术理论研究。Email: 834476440@qq.com; bangyan_liu@126.com

收稿日期: 2017-12-18; 收到修改稿日期: 2018-02-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-03-06

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于贵州省六盘水钟山区大河镇大菁村(26°43' 32" N, 104°49' 49.1" E)。该区域属北亚热带湿润季风气候区,年平均温度 12.3℃,最热月(7月)平均温度 24.6℃,最冷月(1月)平均温度-0.1℃,年平均总积温在 4 410℃~4 806℃之间;年均降水量 1 182 mm,降水量最少月(1月)为 17.6 mm,降水量最多月(6月)为 243.7 mm;年均相对湿度 81%;年日照时数 1 200~1 600 h,日照百分率 28%~36%。

1.2 试验材料

试验栽培品种为太子参施太 1 号,种根进行栽培,栽培材料经贵州大学农学院王华磊教授鉴定为石竹科孩儿参(*Pseudostellaria heterophylla* (Miq.) Pax ex Pax et Hoffm.)的种根。

所用试剂抗坏血酸、钼酸铵、酒石酸氧锶钾、HClO₄、H₂SO₄、NaOH、NH₄F、HCl、NH₄OAc、HNO₃及 K₂Cr₂O₇均为分析纯。营养琼脂培养基、孟加拉红琼脂培养基和高氏一号培养基均购自上海博微生物科技有限公司。

1.3 田间试验设计

试验地土壤类型为黄棕壤。试验于同一缓坡面选取 3 个不同土壤养分地块 I、II、III,其中,地块 I 土壤养分最高,地块 II 土壤养分其次,地块 III 土壤养分最低(具体土壤养分状况见表 1)。采取随机区组设计,不同土壤养分地块各划分 3 个小区,共 9 个小区,小区面积为 1.2 m×10 m,太子参种根用种量为 1 200 kg hm⁻²,均匀散播。于 2015 年 12 月进行播种,底肥为有机肥 1 500 kg hm⁻²,复合肥(N:P:K=15: 15: 15) 600 kg hm⁻²,钙镁磷肥(P₂O₅≥15.0%) 1 125 kg hm⁻²,硫酸钾肥(K₂O≥51.05%, Cl≤1.5%, S≥17.5%) 150 kg hm⁻²,其他田间管理均一致。

表 1 不同土壤养分地块的具体状况

Table 1 Soil conditions of the 3 plots different in soil nutrient

地块 Plot	pH	OM (g kg ⁻¹)	TN (g kg ⁻¹)	AN (mg kg ⁻¹)	TP (g kg ⁻¹)	AP (mg kg ⁻¹)	SAP (mg kg ⁻¹)	RAP (mg kg ⁻¹)	物理性黏 粒 ^① (%)	质地 Texture ^①
I	5.01	78.03	3.50	35.06	0.89	2.92	430.9	186.5	49	重壤土 ^②
II	5.64	55.42	2.47	26.72	0.66	2.02	414.7	189.9	47	重壤土 ^②
III	5.32	42.10	1.89	19.76	0.51	1.99	338.3	236.3	53	重壤土 ^②

注: 1)土壤质地是根据其物理性粘粒利用卡钦斯基制判断。OM: 有机质; TN: 全氮; AN: 碱解氮; TP: 全磷; AP: 有效磷; SAP: 缓效钾; RAP: 速效钾。下同 Note: 1) The soil texture is determined using the Kaczynski system based on its physical clay. OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; AN: Alkaline nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; SAP: Slowly available potassium; RAP: Readily available potassium. ① Physical clay (<0.01 nm); ② Heavy loam. The same below

1.4 土壤样品采集及处理

太子参苗齐后,视太子参生长状况,每半个月至 1 个月进行 1 次采样。每次采样每个小区采用五点法随机选取 5 个点,挖取太子参植株 0~20 cm 土层;完整挖取太子参块根后,将挖取的根部土壤完全收集,混匀,去除石头、枯叶等杂质,作为太子参根部土壤。部分鲜土 4℃储存,做微生物测定用;部分土样风干,研钵研磨,分别过 20 目、50 目和 100 目筛,做土壤酶及土壤化学指标测定用。

1.5 测定方法

土壤化学性质测定方法:有机质采用重铬酸钾容量法^[9];全氮采用凯氏定氮仪法^[10];碱解氮采用碱解扩散法^[9];全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮—钼锑抗比色法测定^[9];有效磷采用 NH₄F-HCl 浸提^[12], ICP-OES 测定 (Optima™8000 型, Perkin 公司, 美国);缓效钾采用热硝酸浸提^[9], ICP-OES 测定;速效钾采用 NH₄OAc 浸提^[9], ICP-OES 测定; pH 采用电位法测定^[11]。

土壤酶活性测定:土壤过氧化氢酶(S-CAT)、土壤多酚氧化酶(S-PPO)、土壤脲酶(S-UE)、土壤酸性磷酸酶(S-ACP)活性分别使用南京建成生物工程研究所土壤过氧化氢酶试剂盒、土壤多酚氧化酶试剂盒、土壤脲酶试剂盒、土壤酸性磷酸酶试剂盒进行测定,土壤酸性转化酶(S-AI)活性使用北京索莱宝科技有限公司土壤酸性转化酶试剂盒测定。S-CAT 以每天每克风干土催化 1 μmolH₂O₂ 降解定义为一个酶活性单位;S-PPO 以每天每克风干土产生 1 mg 紫色没食子素定义为一个酶活性单位;S-UE 以每天每克土样中产生 1 μg NH₃-N 为一个酶活性单位;S-ACP 以 37℃中每克土样每天释放 1 μmol 酚为一个酶活性单位;S-AI 以每天每克土样产生 1 mg 还原糖定义为一个酶活性单位。

土壤微生物测定:细菌、真菌和放线菌数量均采用平板计数法进行测定^[12]。细菌用营养琼脂培

培养基培养, 配方为 (g L^{-1}): 蛋白胨 10.0, 牛肉膏粉 3.0, 氯化钠 5.0, 琼脂 15.0, pH 7.0~7.4; 真菌用孟加拉红琼脂培养基培养, 配方为 (g L^{-1}): 蛋白胨 5.0, 葡萄糖 10.0, 磷酸氢二甲 1.0, 硫酸镁 0.5, 孟加拉红 0.0333, 琼脂 20.0, 氯霉素 0.1, pH 7.0~7.4; 放线菌用高氏一号培养基培养, 配方为 (g L^{-1}): 可溶性淀粉 20.0, 硝酸钾 1.0, 氯化钠 0.5, 磷酸氢二钾 0.5, 硫酸镁 0.5, 硫酸亚铁 0.01, 琼脂 15.0, pH 7.1~7.5。

1.6 数据处理

使用 Excel 2016 进行数据记录及整理, SPSS1.0 进行多重比较、相关性分析及主成分分析, 多重比较采用最小显著差异法 (LSD 法) 进行分析。

2 结果

2.1 不同养分条件下太子参根部土壤化学性状变化的时间动态

由表 2 知, 4—8 月, 不同土壤养分条件下太子参根部土壤变异度较大的化学指标为全磷、有效磷、缓效钾及速效钾含量, 其中地块 I 的变异系数分别为 12.77%、34.22%、32.25%和 47.81%, 以速效钾含量变异最大; 地块 II 的变异系数分别为 20.47%、24.78%、26.2%和 25.8%, 这 4 个化学指标变异度相当; 地块 III 的变异系数分别为 28.04%、48.73%、27.71%和 26.84%, 以有效磷含量变异度最大。说明土壤养分不同, 对磷素与钾素的调节及缓冲能力不同。根部土壤有机质及全氮含量在太子参生育期内的变异系数随土壤养分的降低而增加, 地块 I ~ III 根部土壤有机质含量的变异系数分别为 3.11%、.6%、14.1%; 全氮含量变异系数分别为 4.58%、8.7%、13.51%。太子参整个生长期, 碱解氮含量和 pH 的变异度以低养分地块 III 为最大, 地块 I、II 相对较小, 差异不显著, 地块 I ~ III 土壤碱解氮含量变异系数分别为 12.70%、10.80%、16.6%; pH 变异系数分别为 2.82%、2.68%、3.81%。综合得知, 太子参根部土壤属酸性土, 磷、钾元素含量变异度较大, 有机质、氮素含量及 pH 变化范围较小。

表 2 太子参根部土壤化学性状变化

Table 2 Variation soil chemical properties in the rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla*

地块 Plot	日期 Date (mm-dd)	OM (g kg^{-1})	TN (g kg^{-1})	AN (mg kg^{-1})	TP (g kg^{-1})	AP (mg kg^{-1})	SAP (mg kg^{-1})	RAP (mg kg^{-1})	pH
I	04-14	77.37b	3.57b	36.46a	1.37b	15.036a	788.1a	541.2a	5.76b
	04-27	80.4a	3.66ab	32.67c	1.27b	12.18b	734.5a	10.2d	5.70c
	05-21	74.86c	3.56b	34.34b	1.33b	6.65d	542.2b	173.8d	5.57d
	06-16	76.8b	3.34c	2.26d	1.70a	.05cd	526.6b	222.8c	5.35e
	07-05	7.31a	3.67a	35.0b	1.45ab	10.66bc	312.6c	316.5b	5.81a
	07-24	74.47c	3.2c	26.76e	1.42b	15.6a	342.c	243.1c	5.74b
	08-28	7.81a	3.34c	25.1f	1.32b	6.5d	507.4b	164.1d	5.80a
II	04-14	60.17c	2.70e	23.66c	1.5a	18.06a	676.1a	421.1b	5.27b
	04-27	66.38b	3.01c	30.32a	1.21b	14.32b	62.3a	23.1e	5.17d
	05-21	60.65c	2.86d	24.16c	1.0bc	10.77c	610.6b	222.42f	4.e
	06-16	67.87b	3.08bc	25.47bc	0.0c	10.21c	408.1c	325.2d	5.15d
	07-05	68.12b	3.10b	27.20b	1.33ab	10.22c	341.8d	457.10a	5.47a
	07-24	66.26b	2.75e	21.75d	1.23b	14.00b	411.1c	355.c	5.24c
	08-28	80.23a	3.55a	25.72bc	1.52a	17.37a	673.3a	230.8f	5.2b
III	04-14	32.23e	1.61e	13.4f	0.56d	2.77d	681.1b	536.3a	4.5g
	04-27	50.26c	2.37c	22.3a	1.47a	7.66c	72.6a	32.1c	5.35c
	05-21	52.77ab	2.47b	21.54b	1.23ab	15.6a	673.5b	307.42d	5.24d
	06-16	44.77d	2.14d	18.62d	0.84c	4.75d	531.2c	12.1e	5.07f
	07-05	53.61a	2.55a	23.10a	1.21b	10.32b	350.7d	416.1b	5.21e
	07-24	47.16d	2.08d	16.8e	1.068bc	10.66b	37.1d	37.8bc	5.38b
	08-28	50.66bc	2.34c	1.58c	1.11b	13.80a	557.1c	376.5c	5.57a

注: 同一地块同一列不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different lowercase letters in the same column of the same plot show significant differences. The same below

2.2 不同养分条件下太子参根部土壤酶活性变化的时间动态

4—8月,各土壤养分条件下太子参根部土壤酶活性变异度大小顺序均为 S-AI > S-CAT > S-PPO > S-ACP > S-UE,证明太子参根部土壤酶活性的变异度不受土壤养分高低的影响。由表3知,整个生长时期内,地块I的太子参根部土壤 S-ACP、S-AI、S-UE、S-PPO、S-CAT 活性均值分别为 23.44、37.60、1.34、2.36、26.05 U g⁻¹;高土壤养分条件下,太子参根部土壤酶活性的极值集中出现在太子参生长初期及后期。地块II太子参根部土壤 S-ACP、S-AI、S-UE、S-PPO、S-CAT 活性均值分别为 22.08、35.13、1.32、30.07、20.56 U g⁻¹;中等土壤养分下,太子参根部土壤酶活极值较集中出现在太子参生长中期。地块III太子参根部土壤 S-ACP、S-AI、S-UE、S-PPO、S-CAT 活性均值分别为 21.3、35.24、1.28、2.5、1.53;土壤养分低时,太子参根部土壤酶活极值主要出现在太子参生长中期及后期。综合得知,土壤酶作为催化土壤生化反应的专一催化剂,太子参根部土壤酶活性极值在不同土壤养分条件下出现时期有差异,说明土壤酶对太子参养分需求具有较好的调节作用。

表3 太子参根部土壤酶活性变化

Table 3 Variation of soil enzymatic activity in the rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla*

地块 Plot	日期 Date (mm-dd)	S-ACP (U g ⁻¹)	S-AI (U g ⁻¹)	S-UE (U g ⁻¹)	S-PPO (U g ⁻¹)	S-CAT (U g ⁻¹)
I	04-14	23.67bc	70.70a	1.25e	26.12b	45.22a
	04-27	24.81a	4.52b	1.33c	35.61a	25.85b
	05-21	23.21c	43.86c	1.37b	24.88b	24.24c
	06-16	23.37c	21.11f	1.33c	26.65b	24.87bc
	07-05	24.1b	32.73d	1.32d	33.53a	18.46d
	07-24	20.82d	28.18e	1.37b	35.72a	1.20d
	08-28	23.b	17.12g	1.40a	23.03b	24.54c
II	04-14	23.27b	36.40c	1.28e	26.71de	17.16e
	04-27	22.43c	65.58b	1.42a	40.53a	20.7c
	05-21	23.16b	30.02d	1.23f	23.52e	16.02f
	06-16	24.06a	67.55a	1.2d	25.56de	16.05f
	07-05	23.14b	25.17e	1.35c	35.20b	17.2d
	07-24	18.72e	.74f	1.2d	27.76cd	33.77a
	08-28	1.81d	11.4f	1.3b	31.1c	22.05b
III	04-14	17.0d	27.83cd	1.14f	28.3bc	17.1f
	04-27	21.78c	27.32d	1.30c	30.65abc	20.3b
	05-21	23.48a	65.40a	1.30d	28.16bc	17.85e
	06-16	22.05bc	31.44c	1.30cd	27.65c	17.78e
	07-05	23.65a	5.54b	1.31b	33.80a	25.65a
	07-24	22.16bc	17.84e	1.33a	31.77ab	18.12d
	08-28	22.48b	17.31e	1.2e	2.23bc	1.20c

注: S-ACP: 土壤酸性磷酸酶; S-AI: 土壤酸性转化酶; S-UE: 土壤脲酶; S-PPO: 土壤多酚氧化酶; S-CAT: 土壤过氧化氢酶。
下同 Note: S-ACP: Soil acid phosphatase; S-AI: Soil acid invertase; S-UE: Soil urease; S-PPO: Soil polyphenol oxidase; S-CAT: Soil catalase. The same below

2.3 不同养分条件下太子参根部土壤微生物变化的时间动态

由图1可知:4—7月,地块I、II、III太子参根部土壤细菌数量和真菌数量变化趋势一致;7—8月,地块I、III的土壤细菌菌落和真菌菌落减少,地块II的继续增加。整个生长期间,地块I、II、III太子参根部土壤细菌数量变异系数分别为117.8%、108.5%、5.5%,真菌数量变异系数分别为12.5%、124.5%、111.6%。地块I、II、III土壤放线菌数量在整个生长期变化趋势均一致,均为4—7月份变化较为平稳,7—8月急剧增加,变异系数分别为1.2%、208.3%、12.5%。综合知,太子参种植一茬后微生物种群数发生显著变化,其变异度总体为:放线菌 > 真菌 > 细菌。

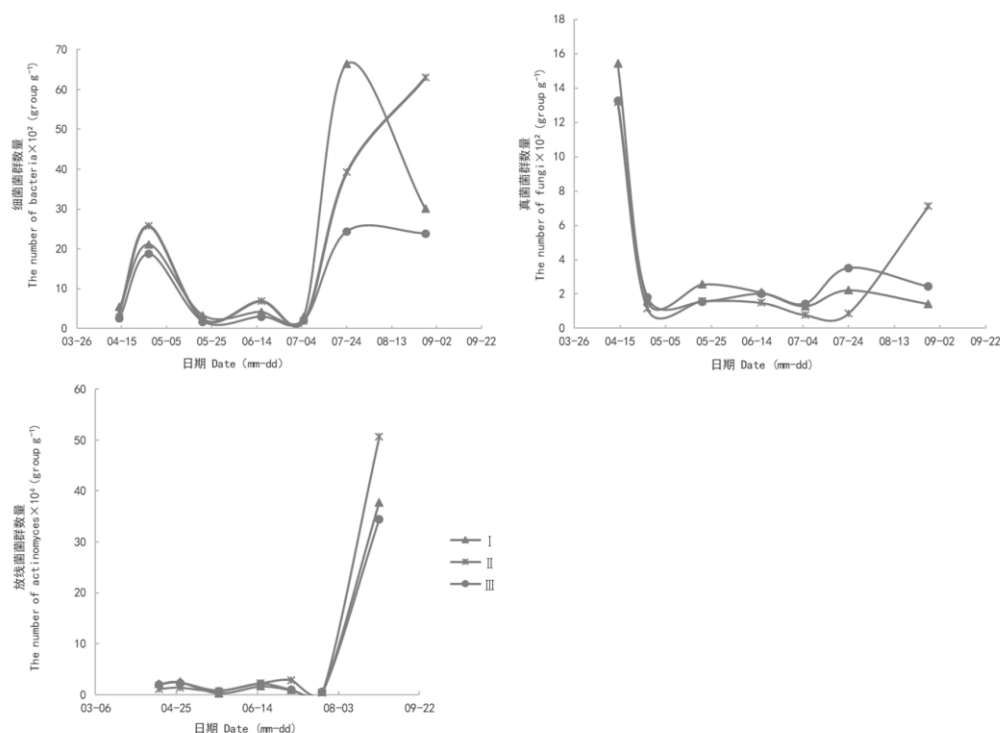


图 1 不同养分下太子参根部土壤微生物数量变化
Fig.1 Variation of soil microbial community in the rhizosphere of *Pseudostellariae heterophylla* relative to soil nutrient condition

2.4 太子参根部土壤各环境指标间的相关性

作物生长中，土壤环境各因子间相互影响，共同作用于作物的生长，具有一定关联性。本研究通过相关分析得出（表 4）：太子参根部土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、pH 间呈极显著正相关；有效磷含量与全磷含量呈显著正相关；有机质含量与速效钾含量间呈显著负相关；S-ACP 活性与全氮含量、碱解氮含量、S-AI 活性呈显著正相关；S-UE 活性与有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、全磷含量呈显著正相关，与速效钾含量呈极显著负相关；S-CAT 活性与碱解氮含量呈显著正相关；细菌数量与有效磷含量、S-UE 活性、放线菌数量呈显著正相关，与 S-ACP 活性呈显著负相关；真菌数量与速效钾含量呈显著正相关，与速效钾含量呈极显著正相关，与 S-UE 活性呈显著负相关；放线菌数量与 S-AI 活性呈显著负相关。可见，太子参根部土壤的化学成分含量、酶活性及微生物种群数量间较多存在显著相关性，直接用这些指标对太子参根部土壤环境进行评价，会出现信息的重叠，影响评价结果的客观性。因此，为进一步了解这些指标间的相关性及其对太子参根部土壤环境的贡献，利用主成分分析方法对太子参根部土壤环境进行综合评价。

表 4 太子参根部土壤各环境指标间的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix between various soil environmental indices in the rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla*

	OM	TN	AN	TP	AP	SAP	RAP	pH	S-ACP	S-AI	S-UE	S-PPO	S-CAT	NB	NF	NA
OM	1	0.7**	0.853**	0.65**	0.360	-0.0	-0.455*	0.63**	0.401	0.056	0.55**	0.056	0.404	0.317	-0.147	0.22
TN		1	0.14**	0.635**	0.340	-0.056	-0.424	0.625**	0.452*	0.168	0.540*	0.081	0.33	0.223	-0.122	0.155
AN			1	0.601**	0.23	0.058	-0.255	0.640**	0.558**	0.384	0.434*	0.148	0.465*	-0.037	-0.044	-0.03
TP				1	0.47*	0.071	-0.168	0.527*	0.324	-0.117	0.484*	0.117	0.283	0.218	-0.005	0.118
AP					1	0.11	0.066	0.151	0.066	0.151	0.268	0.264	0.186	0.442*	0.156	0.173
SAP						1	0.078	-0.11	-0.051	0.250	-0.232	-0.146	0.233	-0.073	0.41*	0.123
RAP							1	-0.11	-0.251	0.15	-0.573**	0.108	0.202	-0.282	0.57**	-0.245
pH								1	0.428	-0.045	0.421	0.116	0.385	0.21	-0.018	0.217
S-ACP									1	0.4*	0.282	-0.04	0.020	-0.464*	-0.260	-0.13
S-AI										1	-0.057	0.135	0.14	-0.426	0.117	-0.436*
S-UE											1	0.403	0.003	0.484*	-0.510*	0.331
S-PPO												1	-0.125	0.310	-0.250	-0.141
S-CAT													1	0.088	0.311	0.001
NB														1	-0.10	0.515*
NF															1	0.035
NA																1

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。NB: 细菌数; NF: 真菌数; NA: 放线菌数 Note: ** Significant correlation on the 0.01 level (bilateral). * Significant correlation on the 0.05 level (bilateral). NB: Number of bacteria; NF: Number of fungi; NA: Number of actinomycetes

2.5 太子参根部土壤环境综合评价

将不同养分条件下太子参不同生长时期根部土壤 16 个环境指标: 有机质含量 (X1)、全氮含量 (X2)、碱解氮含量 (X3)、全磷含量 (X4)、有效磷含量 (X5)、缓效钾含量 (X6)、速效钾含量 (X7)、pH (X8)、S-ACP 活性 (X)、S-AI 活性 (X10)、S-UE 活性 (X11)、S-PPO 活性 (X12)、S-CAT 活性 (X13)、细菌数量 (X14)、真菌数量 (X15)、放线菌数量 (X16) 用 SPSS1.0 进行主成分分析, 以基本特征值大于 1 取得 5 个主成分, 累计贡献率达 7.35%, 即抽取得到的这 5 个主成分涵盖了原始数据信息总量的 7.35%, 能反应太子参根部土壤环境的综合水平。可利用 5 个主成分作为综合变量来评价太子参根部土壤环境状况。

利用各主成分各指标相对应的特征向量值建立 5 个主成分的函数表达式, 将经过标准化后的数据代入式中, 得到不同养分下太子参不同生长时期根部土壤环境在第一主成分至第五主成分的得分; 综合得分使用权重法计算, 为各成分与相对应的贡献率乘积的总和, 即 $F = F_1 \times 32.58\% + F_2 \times 16.8\% + F_3 \times 13.76\% + F_4 \times 3.35\% + F_5 \times 6.77\%$ 。结果 (表 5) 显示, 地块 I 太子参各生长时期的根部土壤综合得分排名均较靠前, 在前 10 名之内, 综合得分均值为 1.636, 说明土壤养分高, 对栽培太子参的根部土壤环境具有较好的调节及缓冲作用; 地块 II 太子参各生长时期的根部土壤综合得分排名则较居中, 综合得分均值为 0.013, 说明中等土壤养分对栽培太子参的根部土壤环境具有较好的保护作用; 地块 III 太子参各生长时期的根部土壤综合得分排名均较靠后, 最后 3 名均在其中, 综合得分均值为 -1.727, 说明土壤养分低影响栽培太子参根部土壤环境的自我调节, 不利于土壤生态系统的持续发展。依据五个主成分得到的综合评分的均值随土壤养分的增加而增加, 证明利用抽取的五个主成分进行太子参根部土壤环境综合评价具有可靠性, 且更为简化, 客观性及实用性强。

表 5 不同土壤养分条件下太子参各时期根部土壤环境指标的各主成分、综合得分及排名

Table 5 Principal components, comprehensive scores and ranking of various soil environmental indexes in the rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla* growing in soils different in soil nutrient condition

地块 Plot	日期 Date (mm-dd)	F1	RF1	F2	RF2	F3	RF3	F4	RF4	F5	RF5	F	RF
I	04-14	4.381	7	8.12	1	4.312	2	-0.326	13	-0.806	16	3.31	1
	04-27	6.367	1	1.485	4	-0.863	11	0.402	8	0.887	5	2.304	2
	05-21	4.400	6	1.247	6	-1.2	18	-2.010	20	-0.106	11	1.175	6
	06-16	3.634	8	0.337	11	-0.87	13	-1.562	18	-0.37	13	0.47	8
	07-05	5.824	2	0.706		-2.268	1	0.323		-1.653	21	1.623	3
	07-24	4.78	5	-3.687	20	0.847	7	2.157	2	-0.848	17	1.18	5
	08-28	5.200	3	-2.74	1	-0.08		-3.461	21	-0.130	12	0.884	
II	04-14	-1.301	11	2.586	2	2.288	3	0.420	7	0.828	6	0.423	10
	04-27	2.653		-0.08	13	-0.867	12	3.205	1	1.804	2	1.150	7
	05-21	-3.317	18	0.32	10	-1.522	15	-1.650	1	1.128	4	-1.302	18
	06-16	-1.381	12	1.303	5	-2.818	21	-0.303	12	0.522	8	-0.610	13
	07-05	1.072	10	-0.470	14	-1.737	16	1.315	4	-1.567	20	0.048	11
	07-24	-1.50	13	-2.276	17	2.273	4	0.25	10	-1.518	1	-0.642	15
	08-28	4.7	4	-4.707	21	4.35	1	-0.385	14	1.42	3	1.571	4
III	04-14	-15.200	21	1.022	8	2.22	5	-0.414	15	-0.734	15	-4.561	21
	04-27	-2.533	17	-0.006	12	0.648	8	0.075	11	0.275		-0.712	16
	05-21	-2.466	16	1.4	3	-1.115	14	0.847	6	1.0	1	-0.45	12
	06-16	-6.654	20	-1.31	15	-2.42	20	-1.178	17	0.541	7	-2.811	20
	07-05	-2.078	14	1.216	7	-1.56	17	1.64	3	-0.54	14	-0.627	14
	07-24	-4.400	1	-2.254	16	-0.42	10	1.06	5	-1.056	18	-1.845	1
	08-28	-2.45	15	-2.34	18	1.437	6	-0.433	16	0.025	10	-1.03	17

注: Fx 代表第 x 主成分得分 (x=1,2,3,4,5), RFx 代表第 x 主成分得分排名; F 代表综合得分, RF 代表综合得分排名 Note: Fx stands for scores of x principal component (x=1,2,3,4,5), RFx for ranking of the x principal component in scoring; F for comprehensive score, and RF for ranking of comprehensive scores

3 讨论

3.1 太子参根部土壤环境变化的时间动态

作物栽培生产过程中, 土壤化学性状因作物生长需耗或栽培措施处理而发生改变。朱丹等^[13]研究表明, 施用谷特菌肥能显著提高土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的水平; 何进等^[14]的研究结果显示, 免耕/深松轮耕既可改善土壤理化性状, 又可提高作物产量; 王玉玲和李军^[15]研究认为免耕/深松和深松/翻耕轮耕模式可创造良好的土壤耕层结构, 提高土壤养分, 促进作物生长发育。综合本研究得知, 太子参根部土壤属弱酸性土, pH 总体在 4.5~5.81 之间, 较为稳定。太子参整个生长过程中, 土壤有机质、全氮及碱解氮含量变异度较小, 较为稳定, 但各时期存在显著差异, 且全氮含量均约等于相应时期有机质含量的 5%^[9]。全磷、缓效钾及有效磷、速效钾含量在太子参生长过程中变异度较大, 各时期差异显著, 速效钾以高养分地块 I 变异度最大, 有效磷以低养分地块 III 变异度最大, 中等养分地块 II 能均衡供给和调节太子参根部土壤各种养分。

土壤酶来源于土壤微生物及动植物活体的分泌, 具有催化生物活性的能力^[16], 其活性可反映土壤中碳、氮分解的方向及强度, 通常被视为土壤质量和土壤生物群的指标, 也可用于确定农业生态系统的可持续性, 特别是土壤理化和微生物过程^[17-18]。本研究得出, 在太子参生长过程中, 土壤 S-AI 活性变异度最大, 变异系数均大于 45%, 其活性与土壤有机质、氮、磷含量及微生物数量和土壤呼吸强度有关, 有效磷含量变异度较大有可能与 S-AI 活性的变异有关。其次为 S-CAT 活性变异度较大, S-CAT 能促进过氧化氢的分解, 利于防止过氧化氢对生物体的毒害作用^[19], 由结果可知, 土壤养分越高, 其防止过氧化能力越强。S-PPO 能催化土壤中芳香族化合物氧化成醌, 醌与土壤中的蛋白质、氨基酸和糖类等反应生成分子量大小不等的有机质和色素^[20], 而地块 I~III 土壤各时期的 S-PPO 活性差异不显著, 可能为各养分土壤有机质变异度不大的原因之一。S-ACP 和 S-UE 变异度较小, 均小于 10%, S-ACP 能催化土壤有机磷矿化形成无机磷^[21-22], 结果说明太子参整个生长过程其根部土壤有机磷矿化速度较为平稳; S-UE 能催化尿素分解, 形成 NH_4^+ , 从而有利于植物的吸收^[22-23], 其活性与土壤微生物数量、有机质、全氮和碱解氮含量呈正相关, 其变异度与土壤有机质及氮素含量的变异度较为一致。

土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的成分, 它对有机质分解、营养循环、植物生长的促进或抑制以及各种土壤物理过程发挥着重要作用, 土壤环境的变化可改变土壤微生物的种群组成和多样性^[24]。本研究发现, 土壤微生物种群数量在太子参旺盛生长期变化较小, 太子参成熟后微生物种群数量发生改变, 细菌和放线菌菌群显著增加, 真菌菌群显著减少, 其可能由土壤环境随太子参生长发生变化引起。具体菌种的菌落变化情况有待进一步研究。

3.2 太子参根部土壤环境随时间动态变化的综合评价

土壤环境中的矿质元素、微生物、酶活性及水、气、热等条件间能相互影响, 彼此促进或制约, 土壤环境的改变是多方面因素多方向作用的结果^[25]。本研究通过相关分析得出, 太子参根部土壤较多矿质元素含量、酶活性及微生物种群数间存在显著相关性, 表明所研究的各土壤环境指标间具有相互作用。其中 5 种土壤酶以 S-UE 活性对土壤养分及土壤微生物的影响最大, 其活性与有机质、碱解氮、全氮、全磷、速效钾、细菌数及真菌数均呈显著正相关关系, 这与刘来等^[25]研究结果相一致。因此, 人们也常用土壤脲酶活性表征土壤氮素状况。前人研究认为, S-ACP 活性与土壤有机质含量、全氮量、土壤 pH 和微生物数量密切相关^[26], 本研究得出 S-ACP 活性与全氮、碱解氮及 S-AI 活性呈显著正相关, 与细菌数呈显著负相关, 细菌数还与有效磷呈显著正相关。土壤养分中有有机质、全氮、碱解氮、全磷及 pH 间互相均呈极显著正相关关系。

主成分分析是通过降维将多个指标化为少数几个综合指标的统计分析方法, 这些综合指标尽可能地反映了原来变量的信息量, 而且彼此之间互不相关^[24]。本研究通过主成分分析进行成分提取, 得到 5 个主成分, 累计方差贡献率为 7.35%, 能近似地反映土壤环境的综合情况。成分综合评分的结果显示, 地块 I~III 的综合得分均值依次为 1.636、0.013、-1.727, 说明土壤养分越高, 综合得分均值越大, 土壤的自我调节及保护能力越强, 土壤环境越佳, 越利于土壤生态系统的持续性发展。

4 结 论

太子参苗齐后至太子参倒苗期间, 不同养分条件下, 太子参根部土壤磷、钾元素含量变动均较大, 有机质、氮素含量及 pH 变化范围均较小, pH 4.5~5.81, 土壤环境为酸性; 太子参根部土壤酶活性的变异度不受土壤养分高低的影响, 均表现为 S-AI > S-CAT > S-PPO > S-ACP > S-UE; 太子参苗齐后, 真菌菌落数均显著减少, 倒苗后细菌和放线菌菌落数均显著增加。太子参根部土壤的化学性状、酶活性及微生物种群间相关性强; 主成分综合评分得出, 土壤养分越高, 综合得分也越高。

参考文献

- [1] 阮奔平. 蔬菜连作障碍中自毒作用及其缓解措施研究. 杭州: 浙江大学, 2013
Ruan Y P. Study on the self-toxicity of vegetable continuous cropping obstacle and its mitigation measures (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [2] 檀国印, 杨志玲, 袁志林, 等. 药用植物连作障碍及其防治途径研究进展. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 197-204
Tan G Y, Yang Z L, Yuan Z L, et al. Advances in the study of continuous cropping obstacles and their prevention and control pathways in medicinal plants (In Chinese). Journal of Northwest Agricultural and Forestry University (Natural Science Edition), 2012, 40(4): 197 - 204
- [3] 张继光, 申国明, 张久权, 等. 烟草连作障碍研究进展. 中国烟草科学, 2011, 32(3): 95-99
Zhang J G, Shen G M, Zhang J Q, et al. Progress in tobacco continuous cropping obstacle (In Chinese). Chinese Tobacco Science, 2011, 32 (3): 95-99
- [4] 林燕华, 韩静, 徐蔚, 等. 太子参连作障碍的研究概况. 中国民族民间医药, 2015, 24(18): 150-151
Lin Y H, Han J, Xu W, et al. Survey of the study of continuous cropping disorder of *Pseudostellaria heterophylla* (In Chinese). Chinese Folk Medicine, 2015, 24(18): 150 - 151
- [5] 孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1201-1208
Sun B, Pan X Z, Wang D J, et al. Effects of nutrient balance on spatial and temporal evolution of soil fertility in different regions of China (In Chinese). Geoscience Progress, 2008, 23(11): 1201 - 1208
- [6] Drinkwater L E, Snapp S S. Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. Advanced Agronomy, 2007, 92: 163-186
- [7] 赵庚星, 李秀娟, 李涛, 等. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析. 农业工程学报, 2005, 21(10): 55-58
Zhao G X, Li X J, Li T, et al. Analysis of soil nutrient situation under different cultivated land use types (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(10): 55-58
- [8] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 92-103
Li J J, Xin J S, Zhang H M, et al. Characteristics of soil nutrient evolution in rice fields in the middle and lower reaches of the Yangtze river during the past 25 years (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 92 - 103
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2013
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [10] 李桂花, 叶小兰, 吕子古, 等. 元素分析仪和全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮之比较. 中国土壤与肥料, 2015(3): 111-115
Li G H, Ye X L, Lü Z G, et al. Comparison of elemental analyzer (Dumas Combustion) and automatic Kjeldahl analyzer (Kjeldahl methods) for determining total nitrogen in soils (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(3): 111-115
- [11] 李强, 文唤成, 胡彩荣. 土壤 pH 值的测定国际国内方法差异研究. 土壤, 2007, 39(3): 488-491
Li Q, Wen H C, Hu C R. Study the difference in determination methods of soil pH values in international and domestic (In Chinese). Soils, 2007, 39(3): 488-491
- [12] 袁婧, 李金玲, 刘宇鹏, 等. 不同生长期太子参根际土壤的理化性质及微生物数量. 贵州农业科学, 2014, 42(10): 138-143
Yuan J, Li J L, Liu Y P, et al. The physicochemical properties and microbial from *Pseudostellaria* rhizosphere soil in different growth period (In Chinese). Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(10): 138-143
- [13] 朱丹, 张磊, 韦泽秀, 等. 菌肥对青稞根际土壤理化性质以及微生物群落的影响. 土壤学报, 2014, 51(3): 627-637
Zhu D, Zhang L, Wei Z X, et al. Effects of bacterial manure on soil physical and chemical properties and microbial communities in barley rhizosphere (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 627 - 637
- [14] 何进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究. 农业工程学报, 2006, 22(10): 62-67
He J, Li H W, Gao H W. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 62 - 67
- [15] 王玉玲, 李军. 利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1139-1150
Wang Y L, Li J. Study on soil physical and chemical characteristics and crop yield in wheat - maize rotation field (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1139 - 1150
- [16] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展. 土壤, 2016, 48(1): 12-21
Wang L D, Wang L F, Guo C X, et al. Progress in research of soil enzyme (In Chinese). Soils, 2016, 48(1): 12-21
- [17] Biting L, Yirui C, Wei Z L, et al. Influence of cerium oxide nanoparticles on the soil enzyme activities in a soil-grass microcosm system. Geoderma, 2017, 299: 54-62
- [18] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171-178
Bian X L, Zhao W L, Yue Z H, et al. Progress in the role of soil enzymes in carbon and nitrogen cycling in agricultural ecosystems (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(4): 171 - 178
- [19] 傅丽君, 李华亮, 钟开新. 杀灭菊酯对土壤过氧化氢酶活性的影响. 生态毒理学报, 2009, 4(2): 265-270
Fu L J, Li H L, Zhong K X. Effects of pyrethroid on soil catalase activity (In Chinese). Ecotoxicological Journal, 2009, 4(2): 265 - 270
- [20] 郝建朝, 吴沿友, 连宾, 等. 土壤多酚氧化酶性质研究及意义. 土壤通报, 2006, 37(3): 470-474
Hao J C, Wu Y Y, Lian B, et al. Study on properties and significance of soil polyphenol oxidase (In Chinese). Chinese Journal of Soil Sciences, 2006, 37(3): 470 - 474
- [21] Pant H K, Warman P R. Enzymatic hydrolysis of soil organic phosphorus by immobilized phosphatases. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30: 306-311
- [22] 于寿娜, 廖敏, 黄昌勇. 镉、汞复合污染对土壤脲酶和酸性磷酸酶活性的影响. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1841-1847
Yu S N, Liao M, Huang C Y. Effects of combined pollution of cadmium and mercury on urease and acid phosphatase activities in soil (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (8): 1841 - 1847
- [23] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性. 生态学报, 2011, 31(19): 5789-5796
Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Soil urease activity at different vegetation succession stages in karst peak-cluster depression, northwest Guangxi (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5789 - 5796
- [24] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究. 土壤学报, 2014, 51(4): 743-752
Zhang H, Lü J L, Cao Y F, et al. Study on decomposition characteristics of different plant straws and soil microbial functional diversity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4): 743 - 752
- [25] 刘来, 黄保健, 孙锦, 等. 大棚辣椒连作土壤微生物数量、酶活性与土壤肥力的关系. 中国土壤与肥料, 2013(2): 5-10
Liu L, Huang B J, Sun J, et al. Relationship between soil microbial quantity, enzyme activity and soil fertility in greenhouse pepper continuous cropping (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(2): 5 - 10

- [26] 戴伟, 白红英. 土壤过氧化氢酶活性及其动力学特征与土壤性质的关系. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 37-41
Dai W, Bai H Y. Relationship between soil catalase activity and its dynamic characteristics and soil properties (In Chinese). Journal of Beijing Forestry University, 1995, 17(1): 37-41

Dynamic change and Comprehensive Evaluation of Soil Environment of Rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla* Relative to Fertility

LIU Bangyan¹ LI Jinling^{1,2} CAO Guofan^{1†} ZHENG Ting¹ HE Bing¹ ZHAO Zhi^{1,2} WANG Huanglei^{1,2}

(1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 Guizhou Key (Engineering) Laboratory of Medicinal Plant Breeding and Planting, Guiyang 550025, China)

Abstract This study aims to explore temporal variation of the soil environment in the rhizosphere of *Pseudostellaria heterophylla* as related to soil nutrient condition, in an attempt to find out a comprehensive method for evaluation of the soil environment in the rhizosphere of *P. heterophylla*, and to provide a theoretical basis for guiding efficient cultivation of *P. heterophylla*. In this study, *P. heterophylla* was planted in three plots different in soil nutrient condition, changes in soil chemical properties, soil enzyme activity and microbial population structure were monitored regularly, and multiple-factor comparisons done. Then principal component analysis of the data was performed for comprehensive evaluation. The results of the study show that during the whole growth period, total phosphorus, slowly available potassium, readily available phosphorus and readily available potassium varied the most significantly in content and S-AI (Soil acid invertase) and S-CAT (Soil catalase) did in activity in the rhizosphere soil of *P. heterophylla* in all the plots. However, organic matter, total nitrogen and alkalytic nitrogen did not vary much in content and S-ACP (Soil acid phosphatase), S-UE (Soil urease) and S-PPO (Soil polyphenol oxidase) did neither in activity in the growing period as a whole. After the plant matured soil bacteria and actinomycetes increased significantly and fungus decreased significantly in population. Among the 16 soil environmental indices, significant correlations were found between some of them. In principal component analysis, five components were extracted with basic eigenvalue being higher than 1. Then comprehensive scoring was performed based on the function expressions of five components. The results show that the higher each soil nutrient in content, the higher the comprehensive score, the better the soil environment. During the growth period of *P. heterophylla*, soil phosphorus and soil potassium vary sharply, making it essential to supplement P and K fertilizers timely, which may be one of the effective measures to improve soil environment in the rhizosphere of *P. heterophylla*. It is, therefore, advisable to conduct comprehensive scoring based on principle component analysis to objectively and efficiently evaluate the soil environment in the rhizosphere of *P. heterophylla*.

Key words Soil nutrient; *Pseudostellaria heterophylla*; Soil enzyme; Soil microorganism; Temporal dynamics; Principal component analysis

(责任编辑: 陈荣府)