

道地产区植参土壤质量等级与品质等级的相关性分析

杨莉¹, 王琪^{1#}, 刘芳君², 刘宇航¹, 勾颖¹, 杨利民^{1*}

(1. 吉林农业大学, 省部共建生态恢复与生态系统管理国家重点实验室培育基地, 吉林 长春 130118;
2. 长春市农业科学院, 吉林 长春 130118)

摘要: 分别以人参产量、品质(人参皂苷 Rb1、Re、Rg1 含量)和参地土壤质量(18 项土壤理化性质)为指标, 结合产量定级法、聚类分析法、主成分分析法对 50 个人参样地进行等级研究, 探索栽培人参的土壤等级划分方法, 为道地产区宜植参土壤的规划发展奠定基础。结果显示: 基于产量、品质指标, 研究区内土壤分级结果符合正态分布, 高产、优质等级较少, 以 III ~ V、II ~ IV 等地为主。基于土壤质量指标, 研究区内土壤质量指数值介于 0.20 ~ 0.59 之间, 以 III ~ IV 等地为主, 土壤中有有效磷、速效钾、有效镁、脲酶、过氧化氢酶 5 个指标的权重系数较高, 是影响植参土壤质量的关键指标。相关分析显示, 以土壤理化性质划分的土壤等级与以人参产量、品质划分的土壤等级间具有较强的正相关关系 ($r=0.58, 0.44$)。综合表明, 以土壤质量划分的土壤等级具有一定代表性, 基于主成分分析法构建的土壤质量评价方法在产地宜植参土壤选择与规划、土壤养护与改良、施肥管理等方面具有生产指导意义。

关键词: 土壤等级; 聚类分析; 主成分分析; 土壤肥力; 生态种植

耕地土壤质量是保证粮食生产安全及农业可持续发展的关键, 我国历来高度重视耕地质量建设与管理工作^[1]。2016 年 12 月, 我国首部耕地质量等级国家标准发布实施, 为开展耕地质量调查监测与评价工作提供了科学的指导和方法。农业农村部据此将全国耕地质量等级由高到底依次划分为 1 ~ 10 等, 为耕地质量建设、农作物栽培管理等提供了有力支撑和明确目标^[2]。药用植物是一种特色经济植物, 目前有关宜植药用植物土地资源质量评价管理与等级划分方面的工作还远远落后于大田作物, 土壤质量优劣的划分主要依靠产量作为评价指标^[3-4]。药农在选地进行药材种植时, 由于没有科学的规划与指导, 单凭产量与经验去种植, 对中药材品质及药效等都是严峻的考验^[5]。

药用植物栽培不同于大田作物, 最显著的区别

是前者具有更强的区域性^[6-7], 原因在于药用植物中主要次生代谢产物的合成积累与环境因子之间的关系更加密切, 目前土壤等生态因子对道地药材的生长及药材中有效成分的合成具有重要影响已在学界达成共识^[8-9]。因此, 发展道地药材栽培、适宜栽培区域的选择与规划均首要考虑区域间的气候、土壤类型差异^[10-11], 并进行道地药材的土壤适应性评价研究。近年来, 为获得对实际生产有更强指导作用的研究结果, 该评价体系中不断补充、增加土地质量、土地利用状况方面的评价因子, 以明确土地现状是否适合发展道地药材栽培^[12]。由此可见, 开展中药材生态适宜区内土壤质量评价及等级划分的研究对于发展药用植物栽培, 规划道地药材生产适宜区, 揭示土壤因子差异与药材品质的内在相关性等具有重要意义。

人参是我国重要的药用植物, 其全球最佳生态适宜产区和潜在种植区主要包括美国、加拿大、中国、俄罗斯、日本等国家, 在中国的生态适宜产区主要包括东北三省、陕西等省区^[13]。目前的研究显示我国人参生态适宜区内植参土壤存在白浆土、黑土、森林土等多个土壤类型, 不同土壤类型之间的土壤肥力与栽培人参产量之间差异显著^[14-15]。本文由此出发, 以吉林省通化市、延吉市为代表区域, 调查了区域内人参种植地土壤质量状况及人参

收稿日期: 2021-12-27; 录用日期: 2022-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1710700); 吉林省科技发展计划项目(20190304022YY, 20200402104NC); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201910193037)。

作者简介: 杨莉(1981-), 副教授, 博士, 从事药用植物连作障碍研究。E-mail: yangliff@126.com。王琪(2001-), 在读本科, 从事药用植物栽培研究。E-mail: 2635666@163.com。杨莉和王琪为共同第一作者。

通讯作者: 杨利民, E-mail: ylmh@163.com。

品质情况,建立基于主成分分析法的植参土壤质量评价方法与基于聚类分析的品质分析法,并与传统的产量定级法进行综合对比,探索植参土壤质量等级与品质等级之间的相关性,以及土壤质量等级划分的合理方法,为人参生产适宜区的合理规划、宜参土壤的质量等级评价等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于吉林省通化市、延吉市两大人参栽培地区,根据《吉林植被》^[16]分区标准,通化地区属于潮湿森林气候地带的抚松-通化温和气候类型,土壤母质为砾质风化物,白浆化过程明显,质地粘重。延吉地区属于湿润森林气候地带的敦化-罗子沟温寒气候类型,土壤类型以暗棕色森林土和棕色森林土为主,部分地区有较深厚的火山灰沉积。2020年9至10月于上述研究区域选择50个栽培户,平均每户参地种植面积大于3.33 hm²,管理经验成熟,年产量较稳定,设为50个样地。

1.2 土壤与人参样品采集

每个样地设置1 m²样方5个,去除表层土壤及杂质后,采集人参根区土壤5份,采集范围为以参根为中心,半径5 cm,深度25 cm。同时在该地收获的人参中选取大小类似的人参5株,低温保存带回实验室,用于品质测定。

1.3 人参产量测定

将样地内5个1 m²样方中人参全部挖取出土,注意保护根部的完整性,抖落根际附着的土壤后,现场测产,标记为该样地产量(kg/m²)。

1.4 人参品质测定

将低温保存运回实验室的人参植物烘干,粉碎过筛(0.25 mm)。精密称取人参粉末1.000 g于锥形瓶中,加入20 mL 80%甲醇后,按照设定的微波条件^[17]进行提取、过滤,滤液减压浓缩定容至5 mL容量瓶中,过微孔滤膜($\Phi=0.22 \mu\text{m}$)后得到待测液。

标准曲线的绘制及样品含量测定:称取3种单体人参皂苷标准品,加入甲醇制成每毫升含人参皂苷Rb₁、Re、Rg₁分别为0.0375、0.075、0.15、0.30、0.60 mg的混标溶液,过微孔滤膜后备用。色谱条件:色谱柱为依利特Hypersil ODS2(250 mm×4.6 mm, 5 μm),检测波长为203 nm,进样体积10 μL ,流速0.8 mL/min,柱温(25.00±0.15) °C,洗脱程

序见表1。精密吸取对照品溶液10 μL 按上述色谱条件进样,以所测得人参皂苷的峰面积为纵坐标(Y),对照品溶液质量浓度为横坐标(X),绘制标准曲线,建立回归方程,结果见表2。

表1 人参皂苷高效液相色谱梯度洗脱程序

洗脱时间 (min)	水 (%)	乙腈 (%)
0	81	19
24	79	21
26	74	26
30	68	32
60	66	34
65	20	80
80	20	80

表2 3种人参皂苷的回归方程

检测成分	回归方程	决定系数	线性范围 (mg/mL)
Rb ₁	Y=3539.8X+12.262	R ² =0.9999	0.0375 ~ 0.6000
Re	Y=3435X-8.2564	R ² =0.9995	0.0375 ~ 0.6000
Rg ₁	Y=4623.1X-3.6071	R ² =0.9996	0.0375 ~ 0.6000

1.5 人参根区土壤质量评价指标的选择及测定方法

土壤质量评价结果应由土壤质量指标来确定,而土壤质量指标是指能够反映土壤实现其功能的程度并且可以测量的土壤属性^[18]。本试验参考国内外相关文献,选取了18个高频指标组成人参土壤质量评价全量数据集(TDS)^[19-21],包括含水量、pH值、EC值、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、阳离子交换量(CEC)、有效镁、有效钙、有效锰、有效锌、蔗糖酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、脲酶、微生物总活性。

测定方法:物理性质:含水量采用烘干法;化学性质:pH和EC值分别采用pH计和EC计、碱解氮采用碱解扩散法、有效磷采用钼锑抗比色法、速效钾和有效镁、钙、锰、锌采用火焰光度法、有机质采用重铬酸钾容量法、CEC采用氯化钡-硫酸快速法;土壤酶活性:蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸法、过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法、酸性磷酸酶采用苯磷酸二钠法、蛋白酶采用加勒斯江法、脲酶采用苯酚钠比色法;土壤微生物:微生物总活性采用荧光素二乙酸酯法。具体测定方法同《土壤农化分析》^[22]和《土壤酶及其研究方法》^[23]。

1.6 基于主成分分析的土壤质量评价方法的构建

①主成分分析:提取累计贡献率大于70%的

主成分；②权重分析：通过主成分分析法提取出全指标数据集的公因子方差，单个指标公因子方差占公因子方差之和的比例为该指标的权重；③隶属度值计算：用于土壤质量评价的隶属函数主要分为升型隶属函数、降型隶属函数和梯型隶属函数。在全指标数据集中除 EC 值采用降型隶属函数和 pH 采用梯型隶属函数外，其余函数均为升型隶属函数。公式为 (1) ~ (3)；④土壤质量评价：采用加权求和模型计算评价单元的土壤质量指数 (SQI)，计算公式为 (4)。

升型隶属函数：

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq d \\ 0.9(x-a)/(d-a)+0.1 & a < x < d \\ 0.1 & x \leq a \end{cases} \quad (1)$$

降型隶属函数：

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \leq a \\ 0.9(d-x)/(d-a)+0.1 & a < x < d \\ 0.1 & x \geq d \end{cases} \quad (2)$$

梯型隶属函数：

$$f(x) = \begin{cases} 1.0-0.9(x-c)/(d-c) & c < x \leq d \\ 1.0 & b < x \leq c \\ 0.9(x-a)/(b-a)+0.1 & a < x < b \\ 0.1 & x \leq a \text{ 或 } x > d \end{cases} \quad (3)$$

式中 x 为土壤指标实际值， a 为各个土壤指标下限值， d 为各个土壤指标上限值， b 、 c 分别为各个土壤指标的临界值。

$$SQI = \sum_{i=1}^n K_i C_i \quad (4)$$

式中 K_i 为土壤因子权重， C_i 为土壤因子隶属度， i 为土壤因子个数。

1.7 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 22.0 对相关数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 基于产量的人参产地等级划分

2.1.1 不同样地人参产量分析

不同样地人参产量测定结果如表 3 所示，由表可见，五年生人参产量最小值为 0.37 kg/m²，最大值为 2.5 kg/m²，平均值为 1.38 kg/m²，变异系数为 43%，六年生人参产量最小值为 1.4 kg/m²，最大值为 3.11 kg/m²，平均值为 1.93 kg/m²，变异系数为

17.82%。整体来看，不同样地间人参产量差异显著，五年生人参产量变幅大于六年生人参产量。

表 3 各样地人参产量测定结果 (kg/m²)

六年生人参		五年生人参	
样地	产量	样地	产量
CS-1	1.82 ± 0.29	SJ-9	1.51 ± 0.09
CS-2	1.66 ± 0.33	SJ-10	2.39 ± 0.35
CS-3	2.00 ± 0.12	SJ-11	0.97 ± 0.06
CS-4	1.40 ± 0.14	SJ-12	1.95 ± 0.26
CS-5	2.10 ± 0.08	WG-1	0.79 ± 0.03
CS-6	2.00 ± 0.12	WG-2	0.45 ± 0.06
CS-7	2.04 ± 0.14	WG-3	0.37 ± 0.03
CS-8	1.59 ± 0.16	WG-4	0.84 ± 0.04
CS-9	2.33 ± 0.31	LJ-1	0.94 ± 0.02
CS-10	3.11 ± 0.22	LJ-2	1.53 ± 0.10
CS-11	2.00 ± 0.72	LJ-3	0.92 ± 0.15
CS-12	1.73 ± 0.15	LJ-4	1.45 ± 0.16
CS-13	1.74 ± 0.25	LJ-5	0.80 ± 0.15
CS-14	2.20 ± 0.05	LJ-6	1.28 ± 0.18
CS-15	1.65 ± 0.08	LJ-7	0.98 ± 0.07
CS-16	2.08 ± 0.07	LJ-8	1.93 ± 0.10
CS-17	1.54 ± 0.13	QG-1	1.57 ± 0.04
SJ-1	1.53 ± 0.05	QG-2	1.21 ± 0.06
SJ-2	1.68 ± 0.06	QG-3	2.07 ± 0.08
SJ-3	1.84 ± 0.10	QG-4	2.21 ± 0.11
SJ-4	2.12 ± 0.13	QG-5	2.13 ± 0.21
SJ-5	2.04 ± 0.16	QG-6	1.50 ± 0.08
SJ-6	2.05 ± 0.05	QG-7	0.83 ± 0.04
SJ-7	1.95 ± 0.10	QG-8	2.50 ± 0.17
SJ-8	2.18 ± 0.05	QG-9	1.46 ± 0.16

注：通化样区主要包括湾沟镇样地 (WG)、松江河镇样地 (SJ) 和抽水乡样地 (CS)，延吉地区主要包括两江镇 (LJ) 和青沟子乡 (QG)，下同。

2.1.2 基于产量的等级划分

结合参农生产经验，按照产量高低设置五、六年生人参样地划分标准，其中五年生 I ~ V 等地的产量标准分别为 >2.5、2.0 ~ 2.5、1.5 ~ 2.0、1.0 ~ 1.5、≤ 1.0 kg/m²；六年生 I ~ V 等地产量标准分别为 >3.0、2.5 ~ 3.0、2.0 ~ 2.5、1.5 ~ 2.0、≤ 1.5 kg/m²。

基于上述分类标准，对各人参样地进行等级划分，结果如图 1，50 个样地中 I 等地 2 个 (占比 4%)，II 等地 4 个 (占比 8%)，III 等地 18 个 (占

比 36%)，IV 等地 15 个 (占比 30%)，V 等地 11 个 (占比 22%)。分类结果符合正态分布，道地产区内高产参地 (I ~ II 等) 较少，以中、低产参地为主，表明人参单产还有进一步提升的空间。

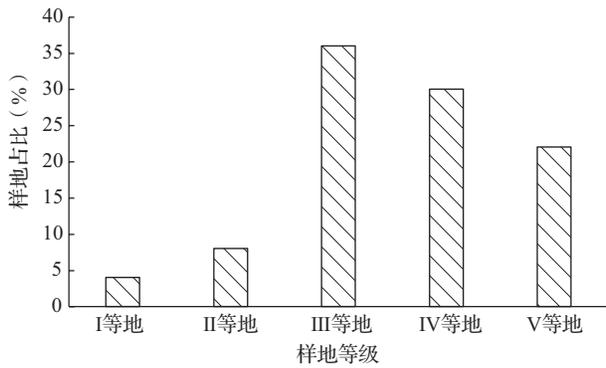


图 1 基于产量的样地等级分析

2.2 基于品质的人参产地等级划分

2.2.1 不同样地人参品质分析

人参皂苷 Rb₁、Re 和 Rg₁ 为《中国药典》中人参品质控制指标，对 50 个样地人参样品中皂苷含量进行测定，结果如表 4 所示，各样地人参样品中人参皂苷 Re+Rg₁ 含量均符合国家标准，但部分地区人参皂苷 Rb₁ 含量略低于国家标准。总体来看，地区间人参皂苷 Rb₁、Re、Rg₁ 的变异系数分别为 38.25%、20.17%、27.48%，为中等变异指标，产地之间人参品质差异显著。

2.2.2 基于人参品质的等级划分

由于人参品质评价指标为多指标体系，各指标之间没有协同增长的规律，因此采用 K 均值聚类分析法对样地等级进行划分，聚类中心分析结果如表 5 所示，基于聚类分析的样地分级占比情况如图 2，

表 4 各样地人参品质测定结果 (mg/g)

样地	人参皂苷含量			样地	人参皂苷含量		
	Rb ₁	Re	Rg ₁		Rb ₁	Re	Rg ₁
CS-1	6.02 ± 0.09	3.96 ± 0.06	2.96 ± 0.03	SJ-9	3.33 ± 0.03	3.02 ± 0.08	2.31 ± 0.05
CS-2	3.11 ± 0.08	2.65 ± 0.03	1.77 ± 0.05	SJ-10	2.95 ± 0.03	1.83 ± 0.02	1.88 ± 0.02
CS-3	3.01 ± 0.94	2.17 ± 0.57	1.60 ± 0.45	SJ-11	5.14 ± 0.09	3.31 ± 0.15	2.55 ± 0.04
CS-4	4.78 ± 0.45	4.08 ± 0.05	1.99 ± 0.02	SJ-12	4.92 ± 0.07	4.11 ± 0.05	2.30 ± 0.03
CS-5	2.21 ± 0.15	2.59 ± 0.14	1.76 ± 0.09	WG-1	1.81 ± 0.01	2.79 ± 0.17	1.71 ± 0.20
CS-6	4.08 ± 0.25	3.50 ± 0.13	1.87 ± 0.02	WG-2	2.07 ± 0.29	2.82 ± 0.28	2.76 ± 0.63
CS-7	5.15 ± 2.40	2.09 ± 0.02	1.67 ± 0.01	WG-3	3.38 ± 0.15	4.15 ± 0.21	1.92 ± 0.16
CS-8	2.91 ± 0.09	3.33 ± 0.13	1.91 ± 0.04	WG-4	1.94 ± 0.23	2.61 ± 0.10	2.56 ± 0.05
CS-9	2.22 ± 0.04	2.74 ± 0.05	1.62 ± 0.04	LJ-1	1.81 ± 0.04	2.96 ± 0.07	2.10 ± 0.05
CS-10	2.07 ± 0.03	3.20 ± 0.04	1.62 ± 0.05	LJ-2	2.29 ± 0.08	3.55 ± 0.08	2.57 ± 0.04
CS-11	4.51 ± 0.19	3.62 ± 0.07	2.62 ± 0.09	LJ-3	2.46 ± 0.08	3.44 ± 0.04	2.15 ± 0.01
CS-12	2.86 ± 0.08	2.80 ± 0.14	1.71 ± 0.07	LJ-4	2.03 ± 0.03	2.99 ± 0.04	2.22 ± 0.04
CS-13	5.56 ± 0.04	3.40 ± 0.05	2.91 ± 0.07	LJ-5	1.69 ± 0.11	2.61 ± 0.09	1.47 ± 0.15
CS-14	2.98 ± 0.03	3.44 ± 0.03	1.32 ± 0.00	LJ-6	2.02 ± 0.04	3.05 ± 0.53	1.91 ± 0.04
CS-15	4.94 ± 0.10	3.88 ± 0.04	2.40 ± 0.01	LJ-7	2.91 ± 0.38	3.87 ± 0.29	1.77 ± 0.19
CS-16	4.85 ± 0.06	4.25 ± 0.05	2.67 ± 0.07	LJ-8	2.91 ± 0.17	4.93 ± 0.42	2.32 ± 0.35
CS-17	3.82 ± 0.05	2.97 ± 0.06	2.74 ± 0.04	QG-1	1.97 ± 0.04	2.38 ± 0.06	1.92 ± 0.02
SJ-1	5.21 ± 0.25	3.17 ± 0.19	4.62 ± 0.20	QG-2	2.41 ± 0.07	2.98 ± 0.04	2.23 ± 0.04
SJ-2	3.96 ± 0.85	3.05 ± 0.65	4.03 ± 0.18	QG-3	1.87 ± 0.11	3.40 ± 0.46	1.95 ± 0.18
SJ-3	4.39 ± 0.17	3.43 ± 0.31	3.06 ± 0.12	QG-4	1.48 ± 0.09	2.08 ± 0.16	1.64 ± 0.11
SJ-4	2.72 ± 0.73	2.92 ± 0.46	2.32 ± 0.52	QG-5	2.87 ± 0.08	3.9 ± 0.19	2.26 ± 0.08
SJ-5	2.65 ± 0.93	2.67 ± 0.32	1.89 ± 0.19	QG-6	2.48 ± 0.04	3.87 ± 0.02	2.33 ± 0.03
SJ-6	2.74 ± 1.12	2.67 ± 0.98	2.37 ± 0.70	QG-7	1.59 ± 0.03	3.11 ± 0.07	1.70 ± 0.05
SJ-7	3.48 ± 0.43	2.96 ± 0.21	2.53 ± 0.49	QG-8	3.18 ± 0.06	4.36 ± 0.06	2.21 ± 0.04
SJ-8	5.15 ± 1.11	3.83 ± 1.02	3.24 ± 0.11	QG-9	3.38 ± 0.88	3.19 ± 0.06	2.12 ± 0.04

50个样地中出产 I 等人参的样地共 9 个 (占比 18%), II 等地共 19 个 (占比 38%), III 等地共 7 个 (占比 14%), IV 等地共 10 个 (占比 20%), V 等地共 5 个 (占比 10%)。分类结果基本符合正态分布,以出产 II 等人参的样地最多,其人参皂苷 Rb1、Re+Rg1 含量分别为《中国药典》标准的 3.50、2.90 倍。出产 V 等人参的样地约占总样地数的 10%,其中人参皂苷 Rb1 含量达不到《中国药典》规定,因此,V 等人参样地应重点关注,查找原因,并调整栽培措施以保证药材品质。

表 5 基于《中国药典》品质评价指标的中心聚类值 (%)

等级	Rb1	Re	Rg1
I 等地	0.8153	0.5325	0.6765
II 等地	0.7006	0.5451	0.3236
III 等地	0.3264	0.7231	0.2128
IV 等地	0.2252	0.3803	0.2588
V 等地	0.1370	0.2078	0.1159

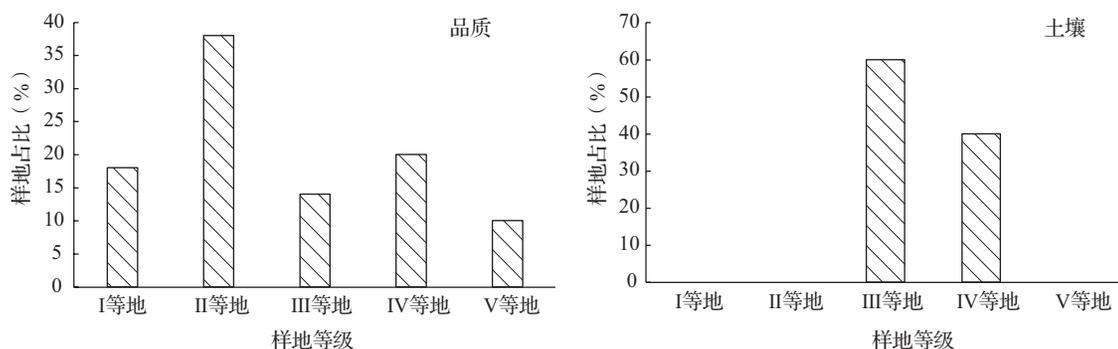


图 2 基于品质和土壤质量指数的样地等级分析

2.3 基于土壤质量的人参产地等级划分

2.3.1 土壤质量的主成分分析

以 18 个指标组成评价土壤质量的 TDS, 采用主成分分析法对不同样地土壤质量进行分析, 结果如表 6 所示, 前 5 个主成分累积贡献率达到 75.88%, 能够解释大部分的土壤指标。各指标的公因子方差及权重系数计算结果见表 6, 土壤中有有效磷、速效钾、有效镁、脲酶、过氧化氢酶 5 个指标权重系数较高, 是影响人参土壤质量的关键指标。

2.3.2 基于土壤质量的等级划分

土壤质量指数 (SQI) 是基于主成分分析得到的权重系数与隶属函数得到的隶属度值计算得到的, 其取值区间为 0 ~ 1, 值越大, 代表土壤质量越好。根据其取值范围, 将土壤肥力等级按照等分法^[24]分为五等, 即 I 等 SQI ∈ (0.8, 1], II 等 SQI ∈ (0.6, 0.8], III 等 SQI ∈ (0.4, 0.6], IV 等 SQI ∈ (0.2, 0.4], V 等 SQI ∈ (0, 0.2]。基于 TDS 的参地土壤等级划分结果如表 7 所示, 50 个样地 SQI 值最高为 0.59, 最低为 0.20, I ~ V 等地分别为 0、0、30、20、0 个, 研究区域内土壤质量主要属于 III、IV 等

地, 分别占总样地的 60%、40%, 以中、低等地为主 (图 2)。

2.4 3 种不同分级方式的比较与分析

分析表 7 中 3 种不同等级划分结果之间的异同, 结果如表 8 所示, 基于土壤质量分级分为 III 和 IV 等的样地中, 产量为 III、IV 等的样地占比分别为 16.00%、20.00% 和 14.00%、16.00%, 品质为 I、II 等级的样地占比分别为 8.00%、24.00% 和 10.00%、14.00%, 高于其他等级; 且在土壤质量等级为 IV 级的土壤中未见产量为 I 等级的样地。其次, 基于产量分级的高产人参样地 (I ~ II 等) 中品质好 (I ~ II 等) 的样地占比较少, 仅为总样地数的 8.00%; 中低产量人参样地 (III ~ V 等) 中包含各个品质等级的人参样地, 产量等级与品质等级间未见显著规律。结合 3 种分级结果的相关分析结果 (表 9) 可知, 土壤质量分级结果与人参产量分级结果、品质分级结果均表现出较强的相关性 ($r=0.58、0.44$), 而后两者之间的相关性较低, 表明土壤质量与产量、品质形成之间关系密切, 采用土壤质量指标对植参土壤进行等级划分具有较高的代表性, 可用于指导生产。

表 6 主成分载荷矩阵及指标权重计算结果

指标	主成分载荷矩阵					公因子方差	权重系数	隶属度函数转折点		临界值
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5			上限	下限	
有效磷 (mg/kg)	0.655	-0.593	0.242	-0.144	0.132	0.868	0.053	15	150	
EC 值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.741	0.175	-0.038	-0.432	0.221	0.818	0.050	140	1260	
有效镁 (mg/kg)	-0.847	0.117	0.277	-0.212	0.202	0.907	0.055	1	10	
有效锰 (mg/kg)	0.584	-0.509	0.273	-0.203	0.045	0.824	0.050	10	100	
有效锌 (mg/kg)	0.794	-0.082	0.341	-0.136	-0.198	0.836	0.051	0.5	2	
微生物总活性 (mg/g)	-0.674	-0.053	0.445	0.092	0.148	0.657	0.040	0.01	0.09	
酸性磷酸酶 (mg/g)	0.588	0.18	0.004	0.511	-0.019	0.606	0.037	3	30	
脲酶 (mg/g)	0.805	0.369	0.196	-0.229	-0.007	0.877	0.053	10	110	
含水量 (%)	-0.683	-0.133	0.435	0.305	0.198	0.819	0.050	30	60	40 ~ 50
碱解氮 (mg/kg)	0.366	0.560	0.064	0.332	0.413	0.696	0.042	50	150	
速效钾 (mg/kg)	0.529	-0.634	0.424	0.137	0.219	0.929	0.056	60	540	
有效钙 (mg/kg)	-0.542	0.575	0.360	-0.303	0.054	0.859	0.052	5	25	
过氧化氢酶 (mg/g)	0.564	0.641	-0.121	-0.198	-0.215	0.858	0.052	0.2	2.5	
pH 值	0.086	0.255	0.660	-0.135	-0.263	0.756	0.046	4.5	8.5	5.5 ~ 6.5
蔗糖酶 (mg/g)	0.169	0.325	0.574	-0.051	0.428	0.663	0.040	60	560	
有机质 (%)	0.589	0.234	-0.035	0.651	0.173	0.823	0.050	1.5	12	
蛋白酶 (mg/g)	-0.144	-0.058	0.469	0.269	-0.665	0.811	0.049	1	12	
CEC (cmol/kg)	0.197	0.245	0.312	0.220	-0.301	0.749	0.045	20	160	
特征值	6.049	2.597	2.166	1.553	1.293					
方差贡献率 (%)	33.604	14.429	12.034	8.628	7.185					
累计贡献率 (%)	33.604	48.033	60.066	68.694	75.879					

表 7 基于土壤质量指数、产量与品质的等级划分结果

样地	SQI	TDS 分级	产量分级	品质分级	样地	SQI	TDS 分级	产量分级	品质分级
CS-1	0.38	IV	IV	V	SJ-9	0.33	IV	III	II
CS-2	0.35	IV	IV	II	SJ-10	0.35	IV	III	II
CS-3	0.38	IV	IV	I	SJ-11	0.32	IV	IV	II
CS-4	0.46	III	V	IV	SJ-12	0.31	IV	III	V
CS-5	0.43	III	III	I	LJ-1	0.37	IV	V	I
CS-6	0.34	IV	IV	IV	LJ-2	0.32	IV	III	II
CS-7	0.35	IV	III	IV	LJ-3	0.28	IV	V	III
CS-8	0.39	IV	IV	II	LJ-4	0.32	IV	IV	II
CS-9	0.49	III	III	I	LJ-5	0.50	III	III	II
CS-10	0.44	III	I	II	LJ-6	0.44	III	II	II
CS-11	0.49	III	IV	IV	LJ-7	0.42	III	V	II
CS-12	0.49	III	IV	II	LJ-8	0.41	III	III	II
CS-13	0.54	III	IV	V	QG-1	0.48	III	V	I
CS-14	0.59	III	III	III	QG-2	0.49	III	V	II
CS-15	0.55	III	IV	IV	QG-3	0.37	IV	V	III
CS-16	0.50	III	III	IV	QG-4	0.47	III	V	III
CS-17	0.51	III	IV	IV	QG-5	0.43	III	V	I
SJ-1	0.41	III	III	II	QG-6	0.40	III	IV	II
SJ-2	0.39	IV	V	I	QG-7	0.41	III	V	II
SJ-3	0.40	III	I	IV	QG-8	0.38	IV	III	I
SJ-4	0.40	III	IV	IV	QG-9	0.39	IV	III	III
SJ-5	0.42	III	IV	V	WG-1	0.27	IV	IV	III
SJ-6	0.42	III	IV	V	WG-2	0.20	IV	II	I
SJ-7	0.46	III	IV	IV	WG-3	0.47	III	II	III
SJ-8	0.43	III	III	II	WG-4	0.49	III	II	II

表 8 3 种分级方法的综合分析

项目		品质等级 (%)					土壤等级 (%)	
		I	II	III	IV	V	III	IV
产量等级 (%)	I	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	4.00	0.00
	II	2.00	4.00	2.00	0.00	0.00	6.00	2.00
	III	6.00	14.00	4.00	4.00	2.00	16.00	14.00
	IV	2.00	12.00	2.00	12.00	8.00	20.00	16.00
	V	8.00	6.00	6.00	2.00	0.00	14.00	8.00
土壤等级 (%)	III	8.00	24.00	6.00	16.00	6.00		
	IV	10.00	14.00	8.00	4.00	4.00		

表 9 3 种分级结果的相关性分析

项目	土壤质量	产量	品质
土壤质量	1.00	0.44	0.58*
产量	0.44	1.00	0.19
品质	0.58*	0.19	1.00

注: $r > 0.5$ 表示二者间具有显著相关关系, 标记为 *, $P < 0.05$ 。

3 讨论与结论

3.1 土壤质量的评价方法

在中药材栽培过程中, 土壤质量对药材产量与品质起着决定性作用。目前, 中药材栽培地土壤肥力评价主要依据的标准有 NY/T 309-1996《全国耕地类型区、耕地地力等级划分》和 GB/T 33469-2016《耕地质量等级》, 这 2 项标准主要针对空间上不同区域土壤肥力进行评价。但在实际生产中, 多数药用植物栽培前后, 土壤肥力会发生极其显著的改变。尤其是药用植物连作通常会造成土壤肥力显著下降, 进而引起土壤质量改变、化感自毒物质增多、有害微生物增多等一系列问题。因此, 人们不仅关注不同栽培地中药材土壤肥力在空间上的差异, 更关注在同一地块上栽培前后、不同栽培阶段、不同栽培方式引起的土壤肥力在时间上的变化, 以及如何调整土壤肥力有利于提高产量和药材品质。

然而考虑到土壤质量评价目的和尺度的不同, 以及土壤本身作为一种复杂的多功能实体, 当前对于土壤质量评价并没有统一的标准、公认的指标体系与划分方法。文献调研显示综合指数法是国内外应用最广泛的土壤质量定量评价方法之一^[25-26], 其核心在于评价指标的筛选及指标权重的赋值, 目前多采用主成分分析法进行相关计算^[27-28]。主成

分分析法是多元统计法的一种, 可以通过对评价指标的特征提取和降维, 将原来多个变量转化为少数几个不相关且包含信息不重复的主成分, 同时最大限度保留原始变量信息。对于多重指标评价体系而言, 主成分分析法有利于简化原始的高维变量和评价过程, 基于客观数据确定指标权重, 避免了主观的随意性^[29-30]。近年来, 随着多元统计分析的普及和应用, 主成分分析逐渐在环境评价领域中得到广泛的应用, 对药用植物土壤质量的相关探索与研究也不断增加, 如刘江等^[31]采用主成分分析法对不同年生甘草地土壤进行了质量评价; 李俊飞等^[3]探讨了高品质西洋参生产的土壤肥力基础。本试验采用主成分分析法的思想构建了研究区内人参土壤质量的评价方法, 结果发现研究区内植参土壤的 SQI 值为 0.20 ~ 0.59, 以 III ~ IV 等地为主, 土壤中有有效磷、速效钾、有效镁、脲酶、过氧化氢酶 5 个指标权重系数较高, 是影响人参土壤质量的关键指标。

3.2 土壤质量等级与药材产量、品质等级的关联性

除关注植药土壤质量评价方法的构建, 目前有关土壤质量指标与药材品质之间的函数关系、土壤质量改良对药材产量与品质的影响大小, 植药土壤的质量等级与其产出的药材产量或品质等级是否一致等问题也是药用植物生态种植的研究热点。本试验采用产量分级法、聚类分析法分别构建了基于人参产量、品质的土壤等级划分方法, 结合相关分析探讨了产量、药材品质分级结果与土壤质量分级结果之间的关联性。结果发现基于产量指标, 研究区内植参土壤以 III ~ V 等地为主; 基于品质指标, 研究区内植参土壤以 II ~ IV 等地为主; 土壤质量分级结果与产量分级结果、品质分级结果表现出一定

程度的重叠与交叉,具有较强的相关性($r=0.58$ 、 0.44),表明土壤质量与人参产量、品质之间具有较强的正相关关系,调整关键土壤质量指标有望在人参产量和品质提升中获得正向响应,采用主成分分析法构建的土壤质量评价方法及其对应的等级划分结果可在预测生产结果、产地土壤规划、土壤改良方向等方面具有一定的指导作用。

由于本试验仅采集了2个产区的土壤,样本量较少,且以往的研究基础数据不足,进一步的试验应当扩大取样面积,丰富栽培土壤类型,以验证该方法的可靠性和代表性。

参考文献:

- [1] 姚东恒,裴久渤,汪景宽. 东北典型黑土区耕地质量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(1): 104-114.
- [2] 申文金,欧阳鑫. 我国土地质量管理标准现状及发展研究[J]. 当代经济, 2021(4): 14-18.
- [3] 李俊飞,焦晓林,毕艳孟,等. 基于药材品质的山东西洋参主产区栽培地土壤肥力质量评价[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(19): 4598-4605.
- [4] 王爱国,马青,何忠俊. 中药材种植基地土壤质量评价现状及展望[J]. 云南农业大学学报, 2008(5): 687-692.
- [5] 李梦,侯旭黎,张宪宝,等. 道地药材生长环境数据库的构建[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(14): 3010-3014.
- [6] 陈士林,索凤梅,韩建萍,等. 中国药材生态适宜性分析及生产区划[J]. 中草药, 2007(4): 481-487.
- [7] 沈亮,孟祥霄,黄林芳,等. 药用植物全球产地生态适宜性研究策略[J]. 世界中医药, 2017, 12(5): 961-968.
- [8] 何冬梅,王海,陈金龙,等. 中药微生态与中药道地性[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 290-302.
- [9] 黄林芳,张翔,陈士林. 道地药材品质生态学研究进展[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2019, 21(5): 844-853.
- [10] 方清茂,彭文甫,吴萍,等. 川产道地药材生产区划研究进展[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(4): 720-731.
- [11] 康传志,吕朝耕,黄璐琦,等. 基于区域分布的常见中药材生态种植模式[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 1982-1989.
- [12] 谢彩香,宋经元,韩建萍,等. 中药材道地性评价与区划研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2016, 18(6): 950-958.
- [13] 沈亮,吴杰,李西文,等. 人参全球产地生态适宜性分析及农田栽培选地规范[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(18): 3314-3322.
- [14] 闫毅,陈丽梅,于海业,等. 林下参土的物理性质[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 71-74.
- [15] 张超宇. 水因子调控对农田栽土壤微生态环境及人参产量和质量的影响[D]. 长春:吉林农业大学, 2017.
- [16] 李建东. 吉林植被[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 2001.
- [17] 张晶,陈全成,弓晓杰,等. 不同提取方法对人参皂苷提取率的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2003(1): 71-72.
- [18] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 88(2): 153-160.
- [19] Franzluebbers A J, Causarano H J, Norfleet M L. Soil conditioning index and soil organic carbon in the midwest and southeastern United States [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2011, 66(3): 178-182.
- [20] Franzluebbers A J, Causarano H J, Norfleet M L. Calibration of the soil conditioning index (SCI) to soil organic carbon in the southeastern USA [J]. Plant & Soil, 2011, 338(1-2): 223-232.
- [21] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- [24] 刘金山. 水旱轮作区土壤养分循环及其肥力质量评价与作物施肥效应研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- [25] 陈梦军,肖盛杨,舒英格. 基于CNKI数据库对土壤质量评价研究现状的分析[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 41-48.
- [26] 李烜楨,骆永明,侯德义. 土壤健康评估指标、框架及程序研究进展[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 617-624.
- [27] 叶少萍,李铤,张俊涛,等. 基于主成分分析的古树土壤肥力综合评价[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 196-205.
- [28] 骆玉珍,张维维,李雅颖,等. 上海市公园绿地土壤肥力特征分析与综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 86-93.
- [29] Xin K, Shaofeng G, Hao H, et al. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe river protected area, China [J]. Chemosphere, 2017, 175: 473-481.
- [30] 赵宇浩,杨玉红,赵浩东,等. 基于主成分分析的沈阳地区水稻土镉污染修复剂修复效果评估[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1220-1226.
- [31] 刘江,吕涛,张立欣,等. 基于主成分分析的不同种植年限甘草地土壤质量评价[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 162-171.

Correlation analysis between soil quality grade and quality grade of cultivated *Panax ginseng* in genuine producing areas

YANG Li¹, WANG Qi^{1#}, LIU Fang-jun², LIU Yu-hang¹, GOU Ying¹, YANG Li-min^{1*} (1. Jilin Agricultural University, Co-construction State Key Laboratory Base of Ecological Restoration and Ecosystem Management, Changchun Jilin 130118; 2. Changchun Academy of Agricultural Science, Changchun Jilin 130118)

Abstract: The valuation and grading of soil quality discrepancy was studied with samples from cultivated ginseng land to lay a foundation for land use planning and development in genuine producing areas. The yield of ginseng, content of ginsenoside (Rb1, Re, Rg1) and soil quality index consisted of 18 physical and chemical properties were used as analysis indicators respectively in three different evaluation methods including yield classification method, cluster analysis method and principal component analysis method. The comprehensive comparison of 50 sample plots was carried out with these evaluation results. It was found that based on the indexes of yield and ginsenoside content, the soil class was distributed in a normal fashion, III ~ IV and II ~ IV level were the main grade respectively. Based on soil quality index, the soil quality index fall in between 0.20 and 0.59, III ~ IV level were the main grade. The weight coefficients of available phosphorus, available potassium, available magnesium, urease and catalase were relatively high, which meant they were the key factors affecting the soil quality of planting ginseng. Results of correlation analysis indicated that there was positive correlation between grading based on soil quality and grading based on yield and ginsenoside content ($r=0.58, 0.44$). The soil grades divided by soil quality are representative on certain degree. The soil quality evaluation method based on principal component analysis could support selecting and planning suitable soil, soil conservation and improvement, fertilization management and so on.

Key words: soil quality grade; cluster analysis; principal component analysis; soil fertility; ecological planting