

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.004

延边州农田栽参参后地土壤肥力评价

房雪¹, 杨涵童¹, 邢金月¹, 邹杭宇¹,
程薪竹¹, 李官浩², 李翔国¹

1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学 食品研究中心, 吉林 延吉 133002

摘要: 为探究延边州农田栽参参后地土壤的肥力水平, 以土壤的 10 种基础理化性质(pH 值、电导率、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾)作为评价指标对延边州 3 市 2 县的 28 块参后地土壤进行主成分分析和隶属函数分析. 结果表明: 延边州参后地土壤 pH 值为 5.78, 电导率为 69.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的平均质量分数分别为 52.11 g/kg, 3.65 g/kg, 24.90 mg/kg, 14.12 mg/kg, 0.94 g/kg, 54.40 mg/kg, 5.33 g/kg, 211.28 mg/kg. 除 pH 值为低等变异水平外(8%), 其余指标均呈中等变异水平. 通过主成分分析法提取出 3 个主成分代表所有信息, 反映了原信息量的 90.387%. 3 市 2 县的土壤肥力综合得分由高到低依次为敦化(1.147)、汪清(0.962)、延吉(0.327)、安图(0.163)、珲春(-2.599). 通过模糊综合评价法对 3 市 2 县的 28 块样点进行排名由高到低依次为敦化(0.747)、汪清(0.731)、延吉(0.678)、安图(0.649)、珲春(0.404). 两种方法的评价结果呈极显著正相关关系, 可以相互佐证, 表明延边州农田栽参参后地土壤状况为中等. 研究结果为延边州农田栽参提供了科学依据.

关键词: 参后地土壤; 主成分分析; 隶属函数; 肥力水平

中图分类号: S158.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2022)02-0028-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation of Soil Fertility after Planting Ginseng in Yanbian Prefecture

FANG Xue¹, YANG Hantong¹, XING Jinyue¹, ZOU Hangyu¹,
CHENG Xinzhu¹, LI Guanhao², LI Xiangguo¹

1. Agricultural College of Yanbian University, Yanji jilin 133002, China;

2. Institute of Food Research, Yanbian University, Yanji jilin 133002, China

Abstract: In order to study the fertility of the soil after planting field ginseng in Yanbian prefecture, the soil of 28 fields post ginseng planting in Yanbian prefecture was analyzed by using main component analy-

收稿日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060555); 国家“十三五”重点研发计划课题(2018YFD0401202).

作者简介: 房雪, 硕士研究生, 主要从事人参栽培的研究.

sis and membership function analysis based on the 10 basic physical and chemical properties (pH value, conductivity, organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium and available potassium). The results showed that the average value of pH, conductivity, and content of organic matter, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, total potassium and available potassium in Yanbian prefecture was 5.78, 69.17 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 52.11 g/kg, 3.65 g/kg, 24.90 mg/kg, 14.12 mg/kg, 0.94 g/kg, 54.40 mg/kg, 5.33 g/kg, 211.28 mg/kg, respectively. Except the low variation level (8%) of pH, the other indexes were at the moderate variation level. Three principal components were extracted by PCA, which reflected 90.387% of the original information. The comprehensive score of soil fertility in three cities and two counties was Dunhua (1.147), Wangqing (0.962), Yanji (0.327), Antu (0.163), Hunchun (−2.599). The 28 sample points of three cities and two counties were ranked by fuzzy comprehensive evaluation method as Dunhua (0.747), Wangqing (0.731), Yanji (0.678), Antu (0.649), Hunchun (0.404). The results of the two methods are highly significantly positively correlated, and can be proved each other, indicating that the soil condition of the farmland post ginseng planting in Yanbian prefecture was moderate. The results provide scientific basis for the cultivation of ginseng in Yanbian prefecture.

Key words: soil after ginseng; principal component analysis; membership function; fertility status

人参(*Panax ginseng* C. A. Mey)为五加科多年生草本植物,是吉林省名贵药材。延边州为吉林省人参产区龙头^[1],已被列为长白山人参国家原产保护区^[2]。现农田栽参模式为人参种植新潮,可以改善参林矛盾,保护自然资源,实现可持续发展。但人参具有极强的忌地性,对土壤肥力要求很高,农田土壤肥力状况远不如林地土壤,连续栽参则会造成人参产量低,病害严重,甚至会绝收,严重制约了我国人参产业的可持续发展^[3-4],所以如何缩短连作年限,合理进行轮作是亟待解决的问题。

土壤理化性质能够直接反应土壤的养分状况,体现土壤的质量^[5-7],土壤质量的好坏直接影响植物的生长和发育。随着种植人参年限增加,会造成土壤板结,容重增大,孔隙度减少,土壤严重酸化^[8-9]等现象。种植人参土壤肥力状况是核心,有机质^[10]、氮、磷和钾质量分数是重要指标,有机质具有保水、保肥、增加通气性等功能,能够提高其耕作能力,其质量分数还可以反应土壤养分的供应能力^[11]。速效成分的氮磷钾直接反应其供应水平,根据其质量分数丰缺情况从而指导施肥。

用于评价土壤肥力的方法有很多,但至今没有统一的肥力评价方法,目前主要有专家打分法、标准综合级别法、灰色关联法、最小数据集法、主成分分析法、模糊综合评价法、投影寻踪模型法、聚类分析法等^[12-17]。包耀贤等^[18]利用土壤理化性质中 8 个指标对红壤性水稻土进行了肥力评价。吕晓男等^[19]选用土壤的有机质质量分数和氮磷钾养分质量分数,采用模糊综合评价法对浙江红壤进行了肥力评价。温延臣等^[20]利用土壤物理、化学和生物学 14 个指标对潮土轮作区进行了肥力评价。吴海燕等^[21]选用土壤酶活性、土壤氮磷钾养分等指标,采用主成分和聚类分析方法对黑土肥力情况进行了评价。杨文娜等^[22]选用土壤理化性质中的 11 个指标,采用主成分分析和模糊综合评价法对喀斯特的土壤进行了肥力评价。

本文选取的 28 个农田栽参后地块,在延边州主要的 3 市 2 县,运用主成分分析法和模糊综合评价法来评价延边州参后地的土壤肥力状况,并对 5 个地区的参后地土壤状况进行评估,为今后科学种植人参、缩短连作年限、合理进行轮作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

通过对延边州走访调查,最后选定延吉市、珲春市、敦化市、汪清县、安图县 5 个地区采集土壤样

品,共选取 28 个采样点来代表延边州参后地土壤状况,各地区土壤类型均为砂壤土,各采样点的详细信息见表 1. 土壤样品为延边州 3 市 2 县进行农田栽参(种植的人参均为 2 年生进行移栽 2 年)起参后的土壤样品. 采集样品时,利用五点取样法,将上层土壤拨去,采样深度在 20 cm 左右,混合 5 点的样品最后留 1 kg 土壤. 回实验室将土壤样品在室内自然风干,粉碎过筛备用.

表 1 采样点编号信息

采样地点	样品编号	采样时间	采样地点	样品编号	采样时间
延吉-依兰	1, 2, 4	2019-09-28	汪清-百草沟	15, 16	2019-09-26
延吉-朝阳川	3	2019-10-02	汪清-十里坪	17	2019-09-26
安图-两江	5	2019-09-26	敦化-小石河	18	2019-10-03
安图-通阳	6, 7	2019-09-26	敦化-民生	19, 20	2019-10-03
安图-新合乡台前村	8, 9	2019-09-26	敦化-新乡村	21, 22	2019-10-03
安图-五虎领隧道	10, 11	2019-09-26	敦化-朝阳川村	23	2019-10-03
珲春-依力马川子	12	2019-09-27	敦化-香水村	24	2019-10-03
珲春-东阿拉	13	2019-09-27	敦化-塔前村	25, 26, 27	2019-10-03
珲春-西藏子	14	2019-09-27	敦化-黑石乡	28	2019-10-03

1.2 测定方法

土壤 pH 值和电导率采用 5 : 1 的水土比,震荡后静止用 pH 计和电导率仪测定;有机质采用外加热常规方法测定;全氮用凯氏法消化,连续流动分析仪测定;铵态氮、硝态氮用氯化钙浸提,连续流动分析仪测定;全磷、全钾用高氯酸-硫酸酸溶法消化,连续流动分析仪测定;速效磷用碳酸氢钠浸提,连续流动分析仪测定;速效钾用乙酸铵浸提,火焰光度法测定. 具体方法参照鲍士旦编著的《土壤农化分析》^[23].

1.3 数据统计与分析

应用 Office Excel 2010 对原始数据进行记录并整理,采用 SPSS 22.0 对数据进行方差分析及主成分分析,并用 Excel 对数据进行隶属函数得分计算,最后进行图形绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标的描述性统计分析

为研究延边州土壤肥力状况,对 28 个采样点的数据进行描述性统计分析,结果见表 2. 结果显示,延边州农田栽参参后地土壤均呈酸性,其中最小值为 4.53,酸化现象比较严重. 参后地土壤中的电导率较低,一般适宜人参生长的电导率在 100~200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 之间,而各地区中电导率的最大值为 118.67 $\mu\text{s}/\text{cm}$,平均值为 69.17 $\mu\text{s}/\text{cm}$,超过 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 的土壤样品占 21%. 各土壤样品中有机质质量分数较高,平均值达到 52.11 g/kg,低于 30 g/kg 的样品仅占 7.1%. 全氮质量分数平均值为 3.65 g/kg,总体属于氮丰富土壤,其中全氮质量分数极差达 6.56 g/kg;硝态氮和铵态氮质量分数的变化幅度为 8.41~50.50 mg/kg 和 10.31~22.78 mg/kg. 在全磷质量分数中来看,变化幅度为 0.31~1.78 g/kg;速效磷质量分数平均值为 54.40 mg/kg,质量分数较低,其中最小值为 15.03 mg/kg,个别地区速效磷处于缺乏状态. 全钾质量分数平均值为 5.33 g/kg,低于适宜作物生长的平均水平,低于 5.00 g/kg 的样品占 43%;速效钾质量分数的变化幅度为 94.59~378.36 mg/kg,其中低于 200 mg/kg 的样品占 54%,总体来看速效钾质量分数较低. pH 值的变异系数(CV)为 8%,属于低等变异水平(CV<10%),其余指标属于中等变异水平.

表 2 土壤肥力评价指标描述性统计 ($n=28$)

土壤指标	极差	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
pH 值	1.88	4.53	6.41	5.78	0.448 9	8
电导率/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	79.60	39.07	118.67	69.17	25.409 1	37
有机质/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	71.44	17.03	88.47	52.11	17.324 3	33
全氮/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	6.56	1.45	8.01	3.65	1.579 3	43
硝态氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	42.09	8.41	50.50	24.90	10.389 5	42
铵态氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	12.47	10.31	22.78	14.12	2.789 9	20
全磷/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.47	0.31	1.78	0.94	0.403 2	43
速效磷/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	84.86	15.03	99.89	54.40	23.578 9	43
全钾/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	6.06	2.71	8.77	5.33	1.509 8	28
速效钾/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	283.77	94.59	378.36	211.28	75.050 5	36

2.2 不同地区土壤养分质量分数状况

28 个采样点为 3 市 2 县的农田栽参参后地土壤，不同地区的土壤状况有所不同(表 3)。结果显示，5 个地区的土壤状况均呈酸性，除安图地区的 pH 值为最低(5.42)外，其余地区间差异无统计学意义($p<0.05$)。汪清地区的电导率最高为 80.09 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，珲春地区的电导率最低为 47.66 $\mu\text{s}/\text{cm}$ ，珲春地区的电导率与其余各地区间差异有统计学意义，其余地区间差异无统计学意义。有机质质量分数的由高到低依次为敦化、汪清、安图、延吉、珲春，且珲春地区的有机质质量分数显著低于其余各地区。土壤全氮质量分数由高到低依次为敦化、汪清、安图、延吉、珲春，其中珲春地区的全氮质量分数最小为 2.30 g/kg，与延吉差异无统计学意义，但与其他地区差异有统计学意义；延吉地区的硝态氮质量分数最高为 29.14 mg/kg，与汪清差异有统计学意义，其中汪清最低为 19.50 mg/kg；土壤铵态氮质量分数中，安图质量分数最高为 15.17 mg/kg，且显著高于延吉和汪清地区，与敦化和珲春间差异无统计学意义。土壤全磷质量分数由高到低依次为汪清、延吉、敦化、安图、珲春；土壤速效磷质量分数由高到低依次为汪清、敦化、延吉、安图、珲春。土壤全钾质量分数中汪清最高为 5.60 g/kg，显著高于珲春地区，珲春地区的全钾质量分数最小为 4.25 g/kg；在速效钾质量分数中汪清和敦化相差不大，分别为 241.54 mg/kg 和 241.58 mg/kg，其次是延吉地区为 201.27 mg/kg，最后为珲春(179.9 mg/kg)和安图(169.86 mg/kg)地区。

表 3 不同地区土壤养分质量分数分析

土壤指标	地 区				
	延吉	珲春	敦化	安图	汪清
pH 值	5.96±0.19a	5.92±0.36a	5.92±0.3a	5.42±0.62b	5.69±0.28ab
电导率/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	75.57±22.03a	47.66±4.8b	69.01±28.72a	70.32±22.33a	80.09±25.06a
有机质/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	48.08±25.09a	34.14±13.19b	59.55±15.97a	50.56±11.86a	51.76±6.67a
全氮/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	3.12±1.09ab	2.30±0.73b	4.14±1.6a	3.66±1.96a	3.86±0.63a
硝态氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	29.14±14.21a	21.56±6.4ab	25.22±11.04ab	25.73±7.98ab	19.50±8.88b
铵态氮/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	12.37±1.96b	13.68±2.49ab	14.6±2.42ab	15.17±3.76a	12.69±1.14b
全磷/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	1.06±0.38ab	0.70±0.23c	0.94±0.33bc	0.82±0.47bc	1.31±0.41a
速效磷/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	58.98±17.67a	40.18±25.49b	60.74±23.49a	44.86±23.58ab	61.55±16.58a
全钾/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	5.40±0.98ab	4.25±1.32b	5.52±0.72a	5.32±2.55ab	5.60±0.74a
速效钾/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	201.27±53.49ab	179.9±82.26b	241.58±76.86a	169.86±42.87b	241.54±87.98a

注：同行小写字母不同表示 $p<0.05$ ，差异有统计学意义。

2.3 土壤养分综合评价

2.3.1 主成分分析法

土壤肥力评价有很多种方法，主成分分析法也是其中的一种。主成分分析法是把很多指标简化为几个

综合评价的指标，具体可以代表所有的指标成分，从而更加清晰地找到众多成分中重要的部分，从而便于对数据进行分析。

2.3.1.1 不同土壤样品主成分分析及其排名

2.3.1.1.1 因子负荷与方差贡献率

利用 SPSS 22.0 对 28 个样品的 10 个土壤养分指标进行了主成分分析，结果见表 4。将各项指标的数据经标准化处理后，计算相关矩阵的特征值和所对应的特征向量。结果表明，前 4 项综合指标的特征值均大于 1，此时累计贡献率为 69.581%，可代表原来所有指标的绝大部分信息。主成分 1(F_1)中主要综合了 pH(−0.667)、电导率(0.838)、全氮(0.572)、硝态氮(0.583)和全磷(0.771)，代表原始数据信息量的 29.720%。主成分 2(F_2)中主要综合了有机质(−0.578)、速效磷(0.540)和全钾(0.625)，代表原始数据信息量的 15.092%。主成分 3(F_3)中主要综合了速效钾(0.449)，代表原始数据信息量的 12.996%。主成分 4 中主要综合了铵态氮(0.565)，代表原始数据信息量的 11.772%。

2.3.1.1.2 主成分得分和综合得分及排名

结果见表 5。根据各主成分的因子负荷和标准化后的养分质量分数数据来计算各主成分的得分，主成分得分(F)计算公式为

$$F = FAC \times \lambda$$

式中， FAC 为标准化数据， λ 为特征值的算数平方根。

综合主成分得分($F_{\text{综合}}$)是计算每个主成分得分与其对应贡献率之乘积的总和，即

$$F_{\text{综合}} = 29.720\% \times F1 + 15.092\% \times F2 + 12.996\% \times F3 + 11.772\% \times F4$$

表 4 主成分在各指标上的因子载荷矩阵和贡献率

指标	主成分 1(F_1)	主成分 2(F_2)	主成分 3(F_3)	主成分 4(F_4)
pH 值	−0.667	−0.006	0.559	−0.279
电导率	0.838	0.072	−0.003	−0.473
有机质	0.401	−0.578	0.460	0.084
全氮	0.572	−0.519	0.311	0.087
硝态氮	0.583	0.210	−0.248	−0.579
铵态氮	0.452	0.080	−0.420	0.565
全磷	0.771	0.003	0.154	0.268
速效磷	0.045	0.540	0.439	0.361
全钾	0.183	0.625	0.152	0.047
速效钾	0.402	0.410	0.449	−0.055
特征值	2.972	1.509	1.300	1.177
方差贡献率/%	29.720	15.092	12.996	11.772
累积方差贡献率/%	29.720	44.812	57.808	69.581

2.3.1.2 不同地区主成分分析及其排名

2.3.1.2.1 因子负荷与方差贡献率

利用 SPSS 22.0 对 5 个地区的 10 个土壤养分指标进行主成分分析，结果见表 6。将各项指标的数据经标准化处理后，计算相关矩阵的特征值和所对应的特征向量。结果表明，前 3 项综合指标的特征值均大于 1，此时累计贡献率为 90.387%，可代表原来所有指标的绝大部分信息。主成分 1(F_1)中主要综合了电导率(0.917)、有机质(0.878)、全氮(0.868)、全磷(0.849)、速效磷(0.936)、全钾(0.960)和速效钾(0.797)，

代表原始数据信息量的 55.821％. 主成分 2(F_1)中主要综合了 pH 值(−0.770)和铵态氮(0.889)，代表原始数据信息量的 21.951％. 主成分 3(F_1)中主要综合了硝态氮(0.953)，代表原始数据信息量的 12.615％.

表 5 各土壤样品主成分得分和综合得分

样品编号	$F1$	$F2$	$F3$	$F4$	F	排名
1	1.142	1.616	−0.335	−2.379	0.373	8
2	−0.340	−0.978	0.771	0.519	−0.126	15
3	−1.305	2.609	−0.442	−0.445	−0.150	16
4	0.006	−1.804	0.919	−0.343	−0.275	18
5	−0.160	1.298	−0.609	−0.142	0.075	12
6	0.244	0.611	−1.587	−2.389	−0.464	22
7	1.179	1.392	−0.247	1.466	1.007	4
8	3.039	−0.078	−2.565	1.987	1.138	3
9	1.789	−2.877	−1.293	0.953	0.060	13
10	−2.560	−1.356	−0.496	0.002	−1.480	27
11	−2.358	−0.948	−0.161	−0.800	−1.378	26
12	−2.105	−1.565	−0.957	−0.987	−1.584	28
13	−1.474	0.762	−0.294	0.399	−0.451	21
14	−1.419	0.687	−1.553	0.194	−0.714	24
15	2.419	0.216	0.223	−0.691	1.005	5
16	−0.012	−0.489	0.676	0.442	0.090	11
17	−0.770	0.927	1.072	0.839	0.215	10
18	−1.871	0.315	0.936	0.285	−0.508	23
19	−0.745	−1.301	0.388	1.005	−0.358	19
20	3.402	0.071	0.046	−0.715	1.356	2
21	1.320	1.035	0.445	0.739	0.997	6
22	−0.903	1.738	0.098	1.990	0.346	9
23	−1.821	−0.368	−0.712	0.228	−0.952	25
24	3.533	−0.642	1.021	−0.297	1.510	1
25	−0.777	−0.461	−0.011	0.312	−0.381	20
26	0.653	−0.037	3.514	−0.172	0.898	7
27	−0.763	0.416	1.289	−0.214	−0.031	14
28	0.658	−0.788	−0.134	−1.787	−0.217	17

2.3.1.2.2 主成分得分和综合得分及排名

结果见表 7. 各主成分得分计算公式同 2.3.1.1.2.

综合主成分得分($F_{综合}$)计算公式为

$$F_{综合} = 55.821\% \times F1 + 21.951\% \times F2 + 12.615\% \times F3$$

根据主成分的综合得分显示，5 个地区的土壤肥力状况排名由高到低依次为敦化(1.147)、汪清(0.962)、延吉(0.327)、安图(0.163)、珲春(−2.599).

2.3.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是模糊数学中的隶属度理论将定性评价转化为定量评价，从而对土壤的养分状况做出综合评价的一种方法. 评价时首先根据土壤养分的各个指标进行隶属度值计算，然后根据养分指标的贡献水平确定权重，最后求出土壤养分综合指数^[24].

表 6 主成分在各指标上的因子载荷矩阵和贡献率

指标	主成分 1(F_1)	主成分 2(F_2)	主成分 3(F_3)
pH 值	-0.074	-0.770	0.439
电导率	0.917	0.079	0.044
有机质	0.878	0.384	0.136
全氮	0.868	0.442	-0.100
硝态氮	0.086	0.231	0.953
铵态氮	-0.228	0.889	-0.039
全磷	0.849	-0.375	-0.244
速效磷	0.936	-0.304	0.140
全钾	0.960	0.228	0.103
速效钾	0.797	-0.355	-0.193
特征值	5.582	2.195	1.261
方差贡献率/%	55.821	21.951	12.615
累积方差贡献率/%	55.821	77.772	90.387

表 7 不同地区土壤养分主成分得分及综合得分

地区	F_1	排名	F_2	排名	F_3	排名	F	排名
延吉	0.616 928 812	3	-1.107 105 473	5	1.540 362 773	1	0.327 117 698	3
安图	-0.657 684 104	4	2.395 078 966	1	-0.089 296 393	3	0.163 024 771	4
珲春	-3.753 290 747	5	-0.913 259 048	4	-0.427 391 940	4	-2.599 388 645	5
汪清	2.236 319 690	1	-0.863 256 626	3	-1.500 958 718	5	0.961 970 870	2
敦化	1.557 726 349	2	0.488 527 365	2	0.477 284 278	2	1.147 271 708	1

2.3.2.1 计算隶属度值

根据前人研究结果^[25]，结合延边州参后地土壤状况，本研究测定的 10 种养分指标中，pH 值采用抛物线型函数计算隶属度值，见公式(1)，转折点取值为 $x_1=4.5$ ， $x_2=5.5$ ， $x_3=6.5$ ， $x_4=7.5$ ；其余的养分指标采用 S 型函数计算隶属度值，见公式(2)。

$$f(x)=\begin{cases}0.9(x-x_3)/(x_4-x_3)+0.1 & x_3\leqslant x\leqslant x_4 \\ 1.0 & x\geqslant x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1\leqslant x\leqslant x_2 \\ 0.1 & x< x_1\end{cases}\tag{1}$$

$$f(x)=\begin{cases}1.0 & x\geqslant x_2 \\ \cdots & \cdots \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1\leqslant x\leqslant x_2 \\ 0.1 & x< x_1\end{cases}\tag{2}$$

其余养分指标在 S 型函数中转折点的取值见表 8。根据建立的隶属度函数公式(1)和公式(2)计算得到各土壤样品中每种养分指标的隶属度值。

表 8 S 型隶属度函数曲线转折点的取值

转折点	电导率/ ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
x_1	40	30	2.0	20	12	0.2	30	4	150
x_2	10	60	3.5	35	16	1.2	80	6	270

注： x_1 代表函数曲线第 1 次转折值， x_2 代表函数曲线第 2 次转折值。

2.3.2.2 各项指标权重系数的确定

每种养分指标对土壤肥力的贡献率不同, 因此赋予每种养分指标一定的权重值是十分必要的. 本研究中采用相关系数法来确定每种养分指标的权重系数: 首先计算出各养分指标间的相关系数(表 9), 然后计算某种养分指标与其他养分指标之间相关系数绝对值的平均值, 该平均值占有养分指标相关系数绝对值的平均值的总和的百分比, 也就是权重系数. 各养分指标的权重系数见表 10.

表 9 不同养分因子间的相关系数矩阵

	pH	电导率	有机质	全氮	硝态氮	铵态氮	全磷	速效磷	全钾
电导率	−0.458 *								
有机质	−0.049	0.259							
全氮	−0.229	0.402 *	0.499 * *						
硝态氮	−0.296	0.710 * *	0.044	0.033					
铵态氮	−0.508 * *	0.103	0.03	0.144	0.124				
全磷	−0.513 * *	0.480 * *	0.317	0.386 *	0.267	0.282			
速效磷	0.064	−0.095	0.023	−0.157	0.023	−0.007	0.234		
全钾	−0.143	0.211	−0.116	−0.012	0.032	0.036	0.01	0.24	
速效钾	0.101	0.37	−0.015	0.162	0.131	0.188	0.331	0.143	0.22

注: * 表示 $p<0.05$, * * 表示 $p<0.01$, 差异有统计学意义.

表 10 各项养分指标的相关系数平均值和权重系数

养分指标	相关系数平均值	权重系数	养分指标	相关系数平均值	权重系数
pH	0.262	0.128 3	铵态氮	0.158	0.077 3
电导率	0.343	0.167 9	全磷	0.313	0.153 3
有机质	0.150	0.073 5	速效磷	0.110	0.053 6
全氮	0.225	0.110 0	全钾	0.113	0.055 4
硝态氮	0.184	0.090 2	速效钾	0.185	0.090 3

2.3.2.3 土壤养分等级综合评价

将每种养分指标的隶属度值乘以权重系数后进行累加, 可得到每个土壤样品(图 1)和每个地区(图 2)基于模糊综合评价法的肥力综合指数(INI), 有学者将其分级: 高($INI\geq 0.8$)、较高($0.6\leq INI<0.8$)、中($0.4\leq INI<0.6$)、较低($0.2\leq INI<0.4$)、低($INI<0.2$). 按照分级方法, 本研究中 28 个样点中 3 个为高、14 个为较高、10 个为中、1 个为较低. 因此, 按照模糊综合评价法, 延边州农田栽参参后地土壤的肥力水平在中等以上. 按照地区由高到低依次为敦化(0.747)、汪清(0.731)、延吉(0.678)、安图(0.649)、珲春(0.404).

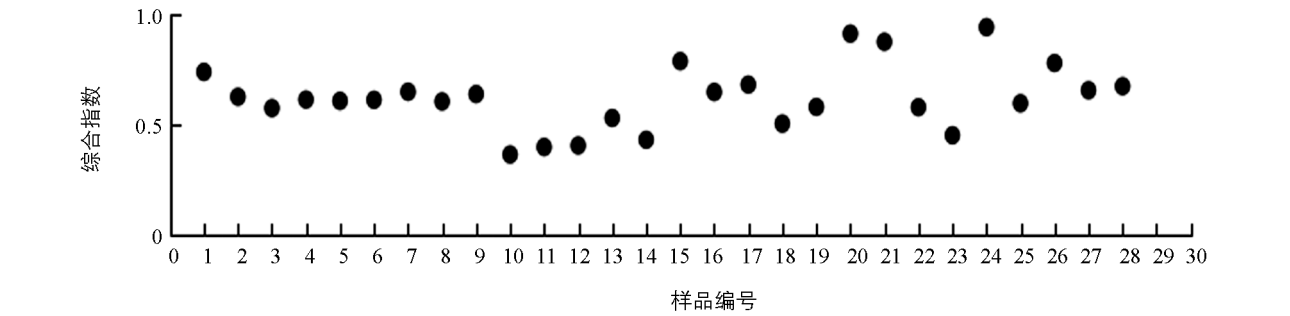


图 1 各样品的土壤养分综合指数

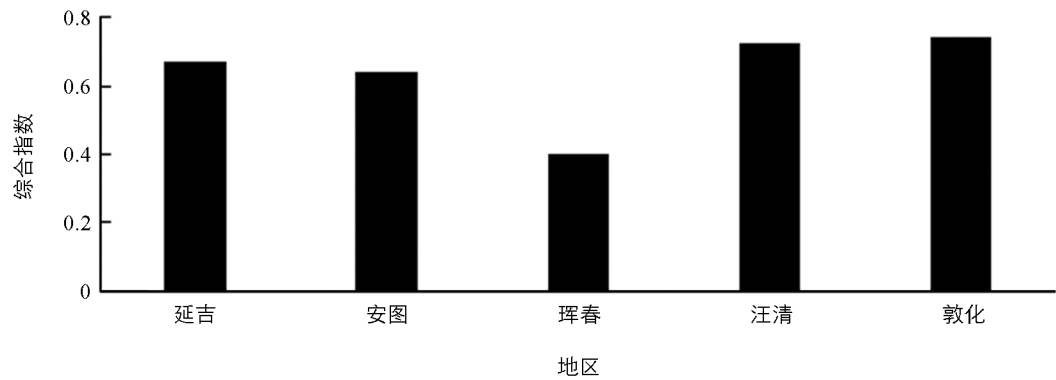


图 2 各地区的土壤养分综合指数

将两种评价方法结果进行相关性分析,表明两种方法的评价结果具有极显著的正相关关系(图 3),说明两种方法可以相互佐证.

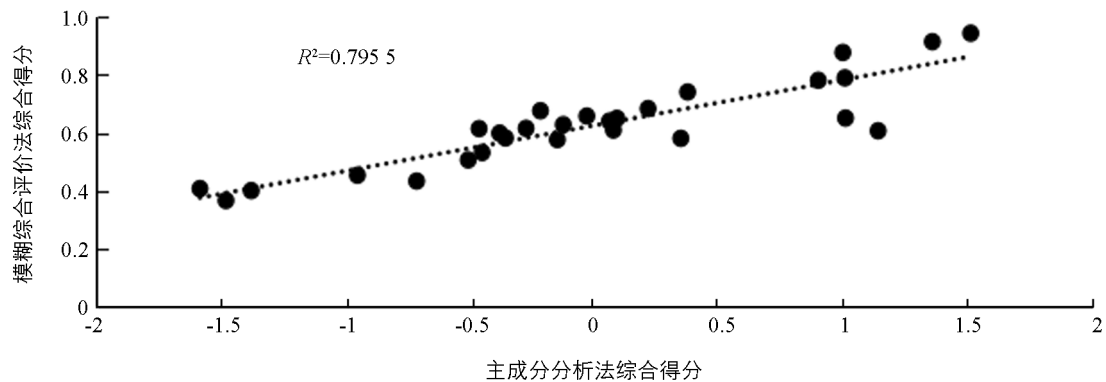


图 3 主成分分析法和模糊综合评价法综合得分的相关性分析

3 讨 论

人参的生长对土壤的环境要求极高,农田栽参同样面临老参地的问题,延边州的老参地土壤养分上呈现出一定的空间变异性,因此调查分析农田土壤的空间变异性十分重要.本文通过对延边州 3 市 2 县的农田栽参后地土壤的养分状况进行调查,发现 pH 值呈低等变异水平,电导率、有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾均呈中等变异水平.黄安等^[26]研究发现土壤养分呈现中等强度空间变异,种植不同作物时土壤养分状况同样呈中等强度空间变异水平^[1-2].各地区的土壤酸化现象严重,随着人参种植年限的增加,参后地逐渐酸化^[27],今后可以添加碱性物质来调节土壤的 pH 值.相较于农作物种植后的土壤,酸化现象严重,参后地的磷钾肥质量分数较农田土壤多,主要是因为种植人参施入了多量的有机肥,而农田地多为化肥为主^[28].

有众多学者运用主成分分析法对土壤的肥力状况进行评价^[29],此方法可以将因子标准化,具有更好的准确性.本文利用主成分分析法选取土壤的 10 个基本理化性质对延边州 28 个参后地土壤样品进行土壤评价,其中敦化市的 24 号样品排名为第一,其次是敦化市的 20 号样品.对 3 市 2 县的综合得分进行排名,由高到低依次为敦化(1.147)、汪清(0.962)、延吉(0.327)、安图(0.163)、珲春(-2.599).陈欢等^[30]利用主成分分析法对沙浆黑土的肥力状况进行了评价,提取出 2 个主成分,反映了原信息量的 88.22%,并探究不同施肥效果的排序.陈玉芹等^[31]同样利用主成分分析和聚类分析法对德宏橡胶林进行了土壤肥力评价,发现要侧重施用磷肥.

模糊综合评价法也是较为常用的一种评价方法,有众多学者采用此方法对土壤进行了肥力评价^[19,32-34].如赵蛟等^[35]采用模糊数学评价法对土壤的 9 种理化指标进行了分析,从而评价竹林的土壤肥力状况,李自林等^[36]采用模糊数学评价法对植烟土壤肥力进行了评价,韦建玉等^[37]采用模糊数学和偏相关

分析法对各植烟区的肥力状况进行了评价。本文通过模糊综合评价法发现:28 个样点土壤等级中 3 个为高、14 个为较高、10 个为中、1 个为较低,3 市 2 县由高到低排名为敦化、汪清、延吉、安图、珲春,同主成分分析方法结论一致。珲春的得分为 0.404,接近较低水平,所以对于后期种植作物时建议施入有机肥料对土壤进行改良,提高土壤肥力。

通过两种方法进行的相关性分析,结果呈现极显著的正相关关系,所以两种方法可以相互佐证,表明两种方法均具有可行性。农田栽参土壤状况差,参后地更为严重,土壤养分的缺失会造成作物减产,并且短期内无法种植人参,所以如何改善参后地土壤状况、有效进行轮作、缩短连作年限,是未来人参发展的重要研究方向。

4 结 论

延边州 pH 值为 5.78,电导率为 $69.17 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾的平均质量分数分别为 $52.11 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $3.65 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $24.90 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $14.12 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $0.94 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $54.40 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $5.33 \text{ g}/\text{kg}$ 、 $211.28 \text{ mg}/\text{kg}$ 。除 pH 值为低等变异水平外($CV=8\%$),其余指标均呈中等变异水平。

通过主成分分析法提取出 3 个主成分代表所有信息,反映了原信息量的 90.387%。3 市 2 县的土壤肥力综合得分由高到低依次为敦化(1.147)、汪清(0.962)、延吉(0.327)、安图(0.163)、珲春(-2.599)。

通过模糊综合评价法对 3 市 2 县的 28 个样点进行排名,由高到低依次为敦化(0.747)、汪清(0.731)、延吉(0.678)、安图(0.649)、珲春(0.404)。

两种方法的评价结果呈极显著正相关关系,可以相互佐证,表明延边州农田参后地土壤状况为中等。

参考文献:

- [1] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等.基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J].生态学杂志,2010,29(1):173-180.
- [2] 赵月玲,林玉玲,曹丽英,等.基于主成分分析和聚类分析的土壤养分特性研究[J].华南农业大学学报,2013,34(4):484-488.
- [3] 张鸿雁,薛泉宏.人参连作障碍防治研究进展[J].江西农业学报,2010,22(6):68-71.
- [4] 吴连举,赵亚会,关一鸣,等.人参连作障碍原因及其防治途径研究进展[J].特产研究,2008,30(2):68-72.
- [5] 许永华,刘晓红,王彦.农田栽参技术要点[J].人参研究,2002,14(2):43-44.
- [6] 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.
- [7] 王月玲,蔡进军,张源润,等.半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J].水土保持研究,2007,14(1):11-14.
- [8] 窦森,张晋京,江源,等.栽参对土壤化学性质的影响[J].吉林农业大学学报,1996,18(3):67-73.
- [9] 李勇,黄小芳,丁万隆.营养元素亏缺对人参根分泌物主成分的影响[J].应用生态学报,2008,19(8):1688-1693.
- [10] 张勇,庞学勇,包维楷,等.土壤有机质及其研究方法综述[J].世界科技研究与发展,2005,27(5):78-84.
- [11] 倪进治,徐建民,谢正苗.土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究[J].植物营养与肥料学报,2001,7(1):56-63.
- [12] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4790-4799.
- [13] 叶回春,张世文,黄元仿,等.北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J].中国农业科学,2013,46(15):3151-3160.
- [14] 王小艳,冯跃华,李云,等.基于主成分和聚类分析的村域稻田土壤肥力评价[J].中国农学通报,2014,30(33):46-50.
- [15] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等.基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J].农业工程学报,2010,26(4):100-105.
- [16] 刘金山,胡承孝,孙学成,等.基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J].土壤通报,2012,43(5):1145-1150.

- [17] 董文涛, 路明浩, 韦大山, 等. 基于模糊数学方法的土壤肥力综合评价及应用 [J]. 资源开发与市场, 2011, 27(6): 511-513.
- [18] 包耀贤, 黄庆海, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 74-81.
- [19] 吕晓男, 陆允甫, 王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(4): 378-382.
- [20] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
- [21] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 325-334.
- [22] 杨文娜, 任嘉欣, 李忠意, 等. 主成分分析法和模糊综合评价法判断喀斯特土壤的肥力水平 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1307-1313.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [24] 李忠意, 程永毅, 宋伟, 等. 重庆紫色土养分的模糊综合评判 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(23): 238-247.
- [25] 吴艾轩, 王鑫, 吕云, 等. 农田栽参土壤养分研究进展 [J]. 北方园艺, 2018(22): 177-186.
- [26] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于主成分分析的土壤养分综合评价 [J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 819-825.
- [27] 谢忠凯, 杨振玲. 长白山区人参土壤钾素营养状况及钾肥肥效 [J]. 人参研究, 1996, 8(3): 4-6.
- [28] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4800-4810.
- [29] 黄婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-147, 187.
- [30] 陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分—聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 609-617.
- [31] 陈玉芹, 胡永亮, 张丽萍, 等. 基于主成分和聚类分析的德宏橡胶林土壤肥力评价 [J]. 热带作物学报, 2019, 40(8): 1461-1467.
- [32] 刘敬珣, 刘晓晖, 陈长清. 湘西烟区土壤肥力状况分析与综合评价 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 46-50.
- [33] 丘秀灵, 刘正富, 阮云泽, 等. 海南胶园土壤肥力评价及影响因素分析 [J]. 广东农业科学, 2009, 36(9): 81-85.
- [34] 李春涛. 我国网球职业化模糊综合评价 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(8): 122-126.
- [35] 赵蛟, 徐梦洁, 庄舜尧, 等. 基于模糊综合评价法的建瓯市毛竹林地土壤肥力评价 [J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1428-1435.
- [36] 李自林, 陆亚春, 赵磊峰, 等. 广西隆林县植烟土壤肥力评价 [J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1042-1048.
- [37] 韦建玉, 黄崇峻, 金亚波, 等. 重庆市主要烟区土壤肥力状况综合评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(11): 30-36.

责任编辑 周仁惠