

刘春铄,方 晶,刘 蕊,等. 不同施氮水平对栽培人参皂苷含量及根际土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(7):160–171.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.07.020

不同施氮水平对栽培人参皂苷含量 及根际土壤的影响

刘春铄¹,方 晶¹,刘 蕊¹,徐哲丰¹,隋佳宏²,王一冰²,张冬雪³,张 涛^{1,2},陈长宝¹

(1. 长春中医药大学吉林省人参科学研究院,吉林长春 130117; 2. 长春中医药大学药学院,吉林长春 130117;

3. 长春生物制品研究所有限责任公司,吉林长春 130022)

摘要:为探究不同施氮水平对老参地土壤中人参质量的影响,筛选出适宜人参生长的氮肥施作方式,以改良后老参地土壤为材料,设置 N0(0 g/kg)、N1(0.35 g/kg)、N2(0.57 g/kg)、N3(0.79 g/kg)4 个施氮处理组。采用高效液相色谱法和化学分析方法对改良老参地土壤中人参皂苷含量、根际土壤理化性质和土壤酶活性进行检测,并结合相关性分析、灰色关联度分析和逐步回归分析等方法,初步明确人参皂苷及根际土壤性质随生长时期变化的规律。相关性分析结果表明,在 N1 处理下,碱解氮含量与人参皂苷 Rf 和 Rb1 含量存在极显著负相关作用($P < 0.01$),而有机质含量和蔗糖酶活性与人参皂苷 Rf 和 Rb1 含量存在正相关作用。灰色关联度分析表明,N1 处理组下人参皂苷与理化性质的灰色关联度为 0.433~0.897。此外,逐步回归及通径分析表明,人参皂苷 Rb1、Rc、Rg3 含量与土壤理化性质和酶活性间呈较好的多元相关性,并与碱解氮、有机质含量和蔗糖酶活性关联性最强。综上所述,人参对于不同施氮水平有一系列的响应规律,N1 处理组对人参皂苷及总皂苷的积累有正向作用,在今后的栽培过程中,建议参考施氮量为 N1(0.35 g/kg),同时增加土壤有机质并改善蔗糖酶活性,以优化土壤环境。这对于改良后老参地土壤合理施用氮素肥料,提高人参品质和产量具有重要意义。

关键词:氮肥;人参皂苷;营养元素;相关性;根际土壤

中图分类号:S567.5⁺10.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)07-0160-12

人参(*Panax ginseng* C. A. Mey.)是五加科(Araliaceae)人参属多年生宿根草本植物^[1]。别名棒槌、地精、黄参、神草、孩儿参等^[2],起源于古生代第三纪^[3],素有“百草之王”的美誉^[4]。现代药理研究证实人参具有多种化学成分^[5],包括皂苷类、多糖类、脂肪酸、蛋白质、酶类、氨基酸、多肽类、聚乙炔醇类等^[6],其中皂苷类为人参主要的药理活性成分^[7],其具有抗肿瘤、保护心脑血管系统、保护神经系统、降低肝损伤、抗病毒及辅助免疫等作用^[8]。

近年来,在我国可持续发展战略的推动下,传统的人参种植方式已逐步转变为人工栽培模式^[9]。

然而,连作会导致人参生长受阻,病害加重,降低药材质量,严重威胁临床用药的安全性^[10]。因此,解决人参连作问题,合理利用有限的参地资源以及合理使用化肥等成为我国人参栽培面临的重要问题。土壤强还原灭菌和土壤熏蒸技术是作物种植前的土壤处理方法,是可以有效缓解连作障碍的土壤改良方式。前期已通过土壤强还原灭菌和土壤熏蒸技术对老参地土壤进行了处理^[11],优质的土壤环境是人参健康生长的基础,然而,改良后的土壤仍然面临着化肥不合理施用和营养元素失衡等问题。因此,有必要对改良后的参地土壤进行深入的研究,以便对营养元素进行调控,为参地资源的合理可持续利用提供科学依据。

氮素作为植物生长发育所需的大量元素之一,是氨基酸和蛋白质的重要组成成分^[12]。合理的氮肥施用可以显著提高植物叶片光合速率、叶绿素含量与氮代谢相关的酶活性,进而提高植物产量。林美霞等发现,施氮量 22.5 g/丛能够更好地协调碳氮代谢水平,增强麻竹光合特性,提高氮代谢关键酶活性,增加麻竹出笋数量^[13]。崔永亮等研究表明,

收稿日期:2024-05-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:82204556、82073969);吉林省科技发展计划(编号:YDZJ202303CGZH011);吉林省重点研发计划(编号:20240305005YY)。

作者简介:刘春铄(1999—),女,吉林四平人,硕士研究生,从事中药资源开发与鉴定方向研究。E-mail:18104443721@163.com。

通信作者:张 涛,博士,副教授,从事中药资源方向的研究, E-mail:251073371@qq.com;陈长宝,博士,研究员,从事药用植物资源学方向的研究, E-mail:ccb2021@126.com。

施氮可通过促进植物生长,增强其抗逆性,从而缓解土壤重金属污染的毒害作用^[14]。而目前鲜见施用氮肥对人参的生理代谢和土壤养分影响的相关研究。因此本研究通过盆栽试验,以改良后的老参地土壤和人参为材料,探究不同浓度外源氮调控下对栽培人参皂苷含量和根际土壤的影响,并结合相关性、灰色关联度和逐步回归分析等统计方法,揭示人参对不同氮肥调控的响应规律,以期为改良后的老参地土壤合理施用氮素肥料提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 仪器 试验用仪器主要有 Agilent 1260 型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司)、M200pro 型酶标仪(瑞士 TECAN 公司)、ZQZY-85CNS 型振荡培养箱(上海知楚仪器有限公司)、HH-8 型数显恒温水浴锅(常州市江南实验仪器厂)、ME204 电子天平(梅特勒-托利多仪器有限公司)、电热鼓风干燥箱(上海恒一科学仪器有限公司)、KQ-500DA 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

1.1.2 试剂 主要试剂有:对照品人参皂苷 Ro(34367-04-9)、Rg1(22427-39-0)、Re(52286-59-6)、Rf(52286-58-5)、Rb1(41753-43-9)、Rc(11021-14-0)、Rb2(11021-13-9)、Rb3(68406-26-8)、Rd(52705-93-8)、Rh2(78214-33-20)、Rg3(14197-60-5)购于上海源叶生物科技有限公司,质量分数均大于 98%。娃哈哈纯净水(杭州娃哈哈集团有限公司)、硫酸(2021041201,成都科隆化学品有限公司)、甲醇、乙腈(色谱纯,赛默飞世尔科技有限公司)、尿素(U11897)、香草醛(A11169)、甲醇(分析纯,天津新通精细化工有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验设计 二年生人参种苗由吉林省抚松县参王植保有限责任公司提供,品种为大马牙,经长春中医药大学吉林省人参科学研究院陈长宝研究员鉴定为五加科植物人参。

试验于 2023 年 5 月 1 日在长春中医药大学吉林省人参科学研究院恒温培养室内进行,所用的塑料盆高为 18 cm,上部口径为 16 cm,下部口径为 14 cm,土壤前期经笔者所在课题组强还原土壤生态修复技术处理后的老参地土壤,经检测碱解氮含量为 35 mg/kg,全磷含量为 476 mg/kg,有效磷含量为 64.38 mg/kg,pH 值为 4.52,土壤容重为 1.16 g/cm³,

含水量为 23%。每盆加入 2 kg 上述土壤,并选取长势良好、个体差异较小且无病虫害的二年生健康人参种苗用无菌水洗净参苗表土,采用斜栽方式进行移栽,每盆栽培 3 株。土上铺 1 层 2 cm 的草炭,用于保持土壤湿度和温度稳定;为避免浇水时盐分流失,于每个盆下垫一塑料托盘。

以尿素作为外源氮,设置不同氮浓度处理试验:N0(0 g/kg)、N1(0.35 g/kg)、N2(0.57 g/kg)、N3(0.79 g/kg),每个处理重复 15 次,共计 60 盆。人参出苗后施加上述氮营养液,每盆 200 mL,试验期间对盆栽定期浇水、除草,使土壤保持湿润且不积水。每隔 14 d 取样 1 次,共取样 5 次,分别为栽种后 34、48、62、76、90 d。

1.2.2 人参干重和鲜重考察 每个处理组随机取样 3 盆,取样当天,将人参清洗干净后用吸水纸吸干,分别称取、计算单支人参鲜重。在 45 ℃ 下将人参烘干至恒重,计算人参干重。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 人参皂苷含量测定 参照 2020 版《中国药典》^[15]提取人参皂苷并测定其含量。使用安捷伦 1260 型高效液相色谱仪,色谱柱为依利特 Hypersil ODS2(250 mm×4.6 mm,5 μm),以娃哈哈纯净水为流动相 A,以色谱乙腈为流动相 B,梯度洗脱(0~18 min,19%~23% B;18~28 min,23%~28% B;28~30 min,28%~32% B;30~50 min,32%~34% B;50~70 min,34%~80% B;70~85 min,80%~19% B),流速为 1.0 mL/min,柱温为 25 ℃,检测波长 203 nm,进样量 10 μL。人参皂苷 Ro、Rg1、Re、Rf、Rb1、Rc、Rb2、Rb3、Rd、Rh2、Rg3 含量的标准曲线如表 1 所示,相关系数均大于 0.999,线性关系良好。

1.3.2 人参总皂苷含量测定 参照 2020 版《中国药典》^[15]和 GB/T 19506—2009《地理标志产品 吉林长白山人参》国家标准提取人参总皂苷并测定其含量。

1.3.3 土壤理化性质测定 选取土壤理化性质指标 pH 值、电导率、容重、土壤含水量、有效磷含量、速效钾含量、碱解氮含量、有机质含量。土壤水分采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 值采用电位法测定;电导率采用电导率仪测定;有效磷、速效钾、碱解氮、有机质含量测定方法参考第三版《土壤农化分析》^[16]。

1.3.4 土壤酶活性测定 选取纤维素酶、蛋白酶、

表 1 人参皂苷标准曲线

人参皂苷	回归方程	相关系数	线性范围 (mg)
Ro 含量	$y = 214.055x + 26.759$	0.999 0	0.001 1 ~ 0.022 0
Rg1 含量	$y = 223.076x + 23.105$	0.999 0	0.001 2 ~ 0.024 0
Re 含量	$y = 220.380x + 10.868$	0.999 8	0.001 1 ~ 0.022 0
Rf 含量	$y = 306.357x + 62.417$	0.999 7	0.001 2 ~ 0.024 0
Rb1 含量	$y = 155.839x + 1.099$	0.999 8	0.001 2 ~ 0.024 0
Rc 含量	$y = 181.626x - 10.791$	0.999 9	0.001 0 ~ 0.020 0
Rb2 含量	$y = 217.709x - 2.963$	0.999 8	0.000 9 ~ 0.018 0
Rb3 含量	$y = 203.643x - 2.797$	0.999 8	0.001 1 ~ 0.022 0
Rd 含量	$y = 212.073x + 1.318$	0.999 8	0.001 2 ~ 0.024 0
Rh2 含量	$y = 152.219x + 9.985$	0.999 7	0.001 3 ~ 0.026 0
Rg3 含量	$y = 509.071x + 44.312$	0.999 8	0.001 0 ~ 0.020 0

淀粉酶、蔗糖酶、脱氢酶、脂肪酶为土壤酶活性指标检测。测定方法参考《土壤酶及其研究法》^[17],使用茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性,使用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶、淀粉酶、纤

维素酶活性,使用氯化三苯基四氮唑比色法(TTC)测定土壤脱氢酶活性,使用碱滴定法测定土壤脂肪酶活性。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2020 进行数据记录、整理;采用 SPSS 21.0 统计软件对数据进行统计分析,使用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 外源氮调控对栽培人参鲜重和干重的影响

外源氮调控对栽培人参干重和鲜重的影响如图 1 所示。与 N0 组相比,N2、N3 组人参鲜重均有显著或极显著上升趋势,N1 组人参鲜重有下降趋势;栽培 62、76、90 d,N2 鲜重均显著高于其他处理组。与 N0 组相比,N1、N2 和 N3 组人参干重均有显著上升趋势;栽培 62、76、90 d 时,N2 组人参干重显著高于 N0 组。

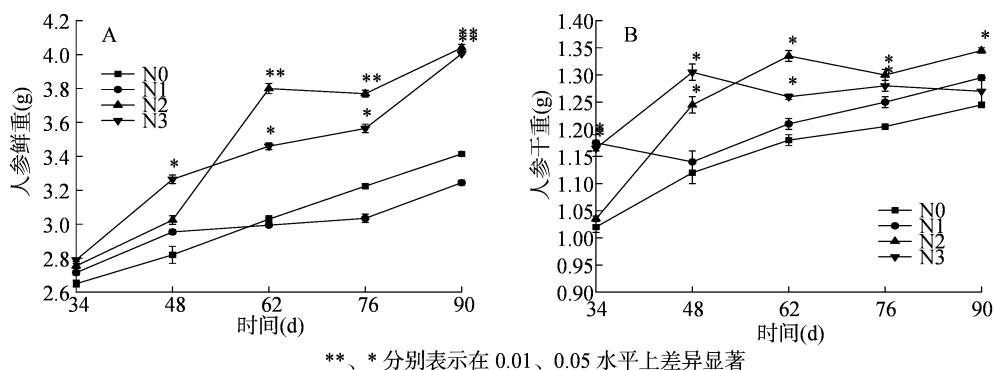


图 1 不同栽培时间人参鲜重与干重变化

2.2 外源氮调控对栽培人参单体皂苷及总皂苷含量的影响

人参皂苷是人参的重要活性成分,根据苷元结构不同,人参皂苷可分为齐墩果烷型和达玛烷型。其中达玛烷型又分为人参二醇型(protopanaxadiol,简称 PPD)和人参三醇型(protopanaxatriol,PPT)^[18],外源氮调控对栽培人参中 PPT 型(Rg1、Re、Rf)和 PPD 型(Rb1、Rb2、Rb3、Rc、Rh2、Rb3、Rd)人参皂苷含量和总皂苷含量的影响见图 2、图 3、图 4、图 5。由图 2 可知,单体皂苷 Rg1、Rf 含量在 N1、N2、N3 处理组中均显著低于 N0 对照组,单体皂苷 Re 含量在 N1 处理组均显著高于其他处理组。

由图 3 可知,单体皂苷 Rb1、Rc、Rb2、Rb3、Rd、Rh2 含量在 N1 处理组均显著高于其他处理组($P < 0.05$)。Rg3 含量在 N1、N2、N3 处理组中均显著低

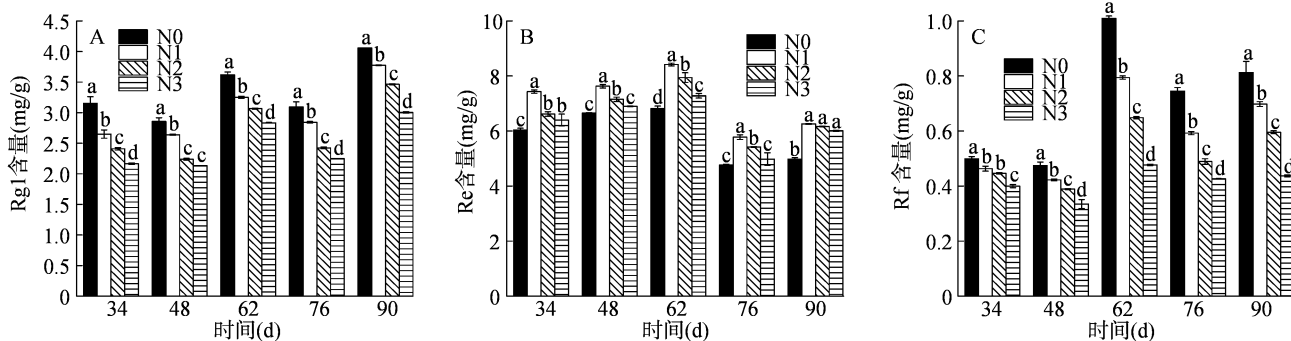
于 N0 对照组。

由图 4 可知,单体皂苷 Ro 含量在 N2、N3 处理组下均小于 N0 对照组。总皂苷含量与 Re、Rb1、Rc、Rb2、Rb3、Rd、Rh2 单体皂苷含量变化趋势相似,且 N1 组含量显著高于 N2、N3 组。

由图 5 可知,PPT 与 PPD 型皂苷含量总和变化趋势相似,N1、N2、N3 处理组随氮浓度的增大,2 种构型皂苷总和含量均在减少,但 PPT/PPD 比值在各处理组下均小于 1,说明同一浓度调控下 PPD 型积累量更多。

2.3 外源氮调控对栽培人参土壤理化性质的影响

由表 2 可知,土壤的理化性质是评价土壤健康状况的重要指标^[19],适宜的土壤 pH 值是植物生长的关键因素之一。研究发现,随栽培时间的延长,土壤 pH 值整体有不同程度降低,土壤酸度逐渐升



柱子上的不同小写字母表示相同处理时间不同氮浓度间在 0.05 水平上差异显著

图2 PPT 型人参皂苷含量变化

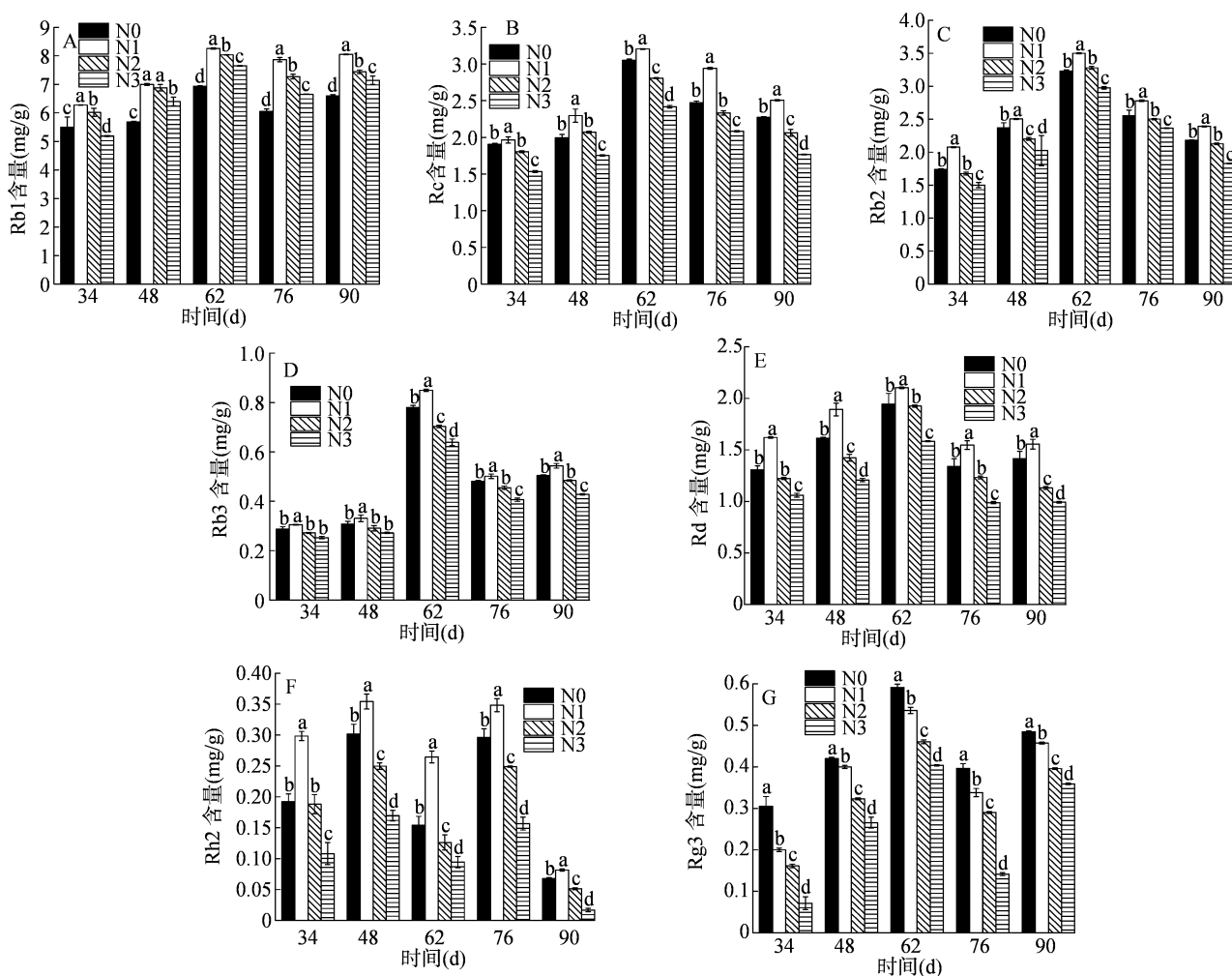


图3 PPD 型人参皂苷含量变化

高,有研究表明适宜农田人参生长的 pH 值在 4.8 ~ 6.4 之间^[20],各处理组的土壤 pH 值均在 4.22 ~ 5.11 之间变化,较适宜人参生长;各组土壤电导率呈先升后降趋势,均在栽培 76 d 时达到峰值,栽培 90 d 时,与 N0 相比,N1、N2、N3 电导率值分别显著提高 103.03%、143.73%、260.61% ($P < 0.05$),其

中,N0、N1 组电导率大多在 50 ~ 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,较为适宜人参生长;N0 和 N2 组栽培期间土壤中碱解氮含量变化趋势基本一致,均有先降后升再降的趋势;N1 组在栽培 62 d 和 76 d 时碱解氮含量相差不大;N3 组在栽培 62 d 和 90 d 时碱解氮含量相差不大;N0、N2 组的土壤有效磷含量均呈倒“V”形变化,

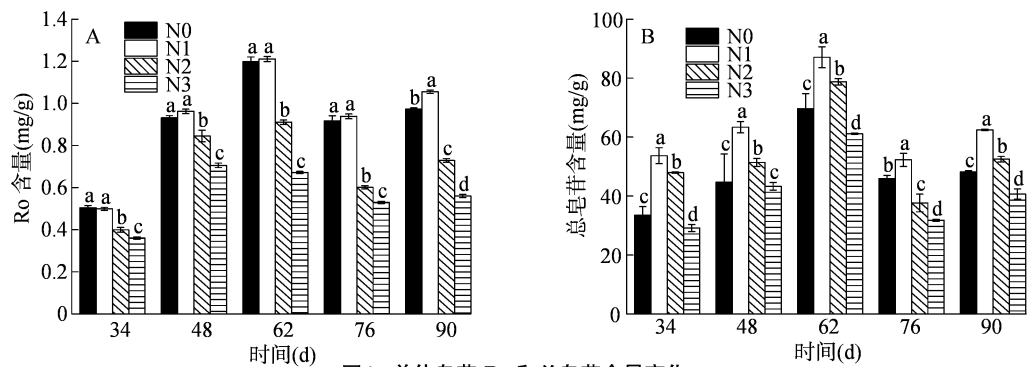


图4 单体皂苷 Ro 和总皂苷含量变化

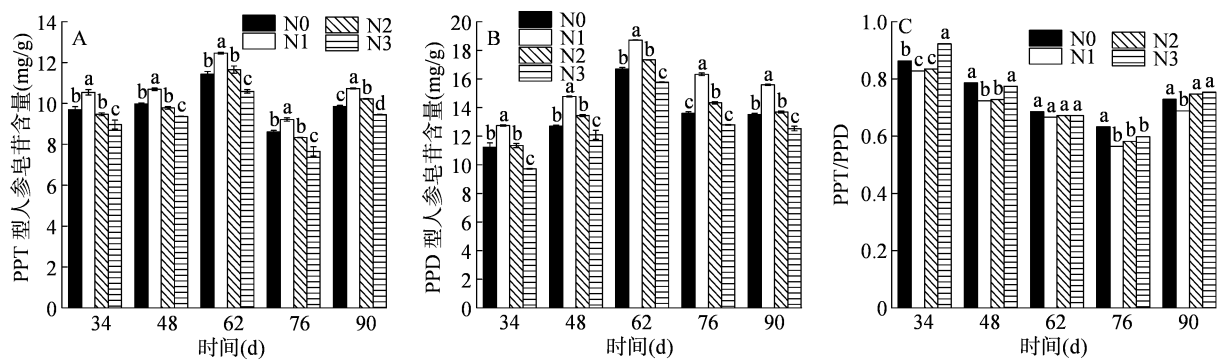


图5 PPD、PPT 型皂苷总和含量与 PPT/PPD 比值变化

表 2 不同氮水平土壤理化性质变化

时间	处理	pH 值	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (%)
34 d	N0	4.99 \pm 0.02a	33.33 \pm 7.77d	43.17 \pm 1.46d	78.76 \pm 0.40d	176.85 \pm 0.15d	26.62 \pm 0.35c
	N1	4.88 \pm 0.02b	166.00 \pm 12.53c	246.40 \pm 1.40c	137.10 \pm 6.13a	179.24 \pm 0.00c	25.87 \pm 0.26c
	N2	5.01 \pm 0.01a	206.33 \pm 14.36b	290.97 \pm 1.62b	84.19 \pm 3.12c	184.39 \pm 0.18b	28.58 \pm 0.35b
	N3	4.86 \pm 0.01b	300.33 \pm 15.04a	405.30 \pm 3.05a	88.88 \pm 13.29b	197.69 \pm 0.04a	30.02 \pm 0.13a
48 d	N0	5.11 \pm 0.02a	44.33 \pm 10.41d	42.47 \pm 2.25d	80.41 \pm 1.29c	189.61 \pm 0.07d	27.60 \pm 0.39c
	N1	4.37 \pm 0.03d	194.00 \pm 9.54c	239.40 \pm 1.85c	97.13 \pm 5.52b	194.42 \pm 0.04c	34.99 \pm 0.65b
	N2	4.86 \pm 0.02b	261.67 \pm 10.97b	267.40 \pm 0.70b	100.74 \pm 7.03a	209.49 \pm 0.08b	37.26 \pm 0.65a
	N3	4.52 \pm 0.01c	322.00 \pm 8.66a	382.37 \pm 2.01a	75.93 \pm 1.64d	228.61 \pm 0.05a	38.91 \pm 1.48a
62 d	N0	5.00 \pm 0.01a	79.33 \pm 10.97d	28.83 \pm 0.21d	86.77 \pm 0.36c	170.00 \pm 0.07d	30.85 \pm 0.65d
	N1	4.23 \pm 0.00c	280.00 \pm 9.17c	206.93 \pm 1.07c	99.19 \pm 2.58a	219.48 \pm 0.11c	35.37 \pm 0.65c
	N2	4.27 \pm 0.00c	293.33 \pm 11.72b	281.93 \pm 1.16b	91.81 \pm 0.80b	241.14 \pm 0.06b	37.26 \pm 0.65b
	N3	4.55 \pm 0.01b	371.00 \pm 5.57a	353.87 \pm 1.43a	68.89 \pm 1.18d	256.96 \pm 0.06a	42.16 \pm 0.65a
76 d	N0	4.99 \pm 0.02a	97.67 \pm 3.51d	36.40 \pm 0.70d	80.06 \pm 0.30a	186.26 \pm 0.16d	28.58 \pm 0.65c
	N1	4.53 \pm 0.01b	283.00 \pm 8.89c	210.00 \pm 3.50c	72.90 \pm 2.79c	227.51 \pm 0.06c	29.71 \pm 0.65c
	N2	4.44 \pm 0.01c	320.67 \pm 14.05b	266.23 \pm 1.07b	76.12 \pm 1.36b	265.19 \pm 0.00b	31.98 \pm 0.65b
	N3	4.56 \pm 0.01b	427.33 \pm 7.51a	363.87 \pm 1.46a	71.48 \pm 2.26d	287.28 \pm 0.04a	35.37 \pm 0.65a
90 d	N0	4.81 \pm 0.00a	77.00 \pm 12.53d	31.77 \pm 1.07d	73.99 \pm 1.38c	176.62 \pm 0.06d	30.85 \pm 0.65b
	N1	4.73 \pm 0.00b	156.33 \pm 7.02c	194.60 \pm 3.21c	84.17 \pm 3.42b	206.42 \pm 0.15c	31.60 \pm 0.65a
	N2	4.38 \pm 0.00c	187.67 \pm 12.58b	273.50 \pm 3.00b	65.88 \pm 2.02d	308.80 \pm 0.06b	30.47 \pm 0.65b
	N3	4.22 \pm 0.02d	277.67 \pm 11.50a	350.40 \pm 0.36a	100.37 \pm 1.27a	312.99 \pm 0.07a	28.58 \pm 0.65c

注:同列数据后不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

栽培 90 d 时,与 N0 组相比,N1、N3 组有效磷含量分别显著提升 13.76%、35.65% (N2 组有效磷含量显著降低 10.96%);N0 组速效钾含量呈“M”形变化,N1 组呈缓慢上升后下降趋势、N2 和 N3 组呈持续上升趋势,栽培 90 d 时,与 N0 组相比,N1、N2、N3 组土壤速效钾含量分别是 N0 组的 1.17、1.75、1.77 倍;各组有机质含量整体为先上升后下降趋势。

2.4 外源氮调控对栽培人参土壤酶活性的影响

土壤纤维素酶是土壤中一种复合酶,可以将含纤维素凋落物分解并转化为可被土壤微生物利用的含碳营养物质,在土壤碳代谢中占据重要地位^[21]。由图 6-A 可知,随氮肥浓度的提升,纤维素酶活性受到显著抑制,表明土壤纤维素酶活性与氮肥浓度呈显著负相关,栽培 90 d 时,与 N0 组相比,N1、N2、N3 组纤维素酶活性分别下降 4.51%、14.36%、24.94%。土壤蛋白酶常用于表示土壤氮素含量的变化^[22],如图 6-B 所示,随氮肥浓度的提升,蛋白酶活性显著下降($P < 0.05$),表明土壤蛋白酶活性与氮肥浓度呈显著负相关,栽培 34、90 d 时,

N2、N3 组的土壤蛋白酶活性无显著差异。由图 6-C 可知,随氮肥浓度的提升,与 N0 组相比,N1 组淀粉酶活性在栽培前期(34 d)有显著上升趋势,N2、N3 组淀粉酶活性受到显著抑制,且 N2、N3 2 组间无显著差异。栽培 90 d 时,N1、N2、N3 组淀粉酶活性分别下降了 20.29%、26.22%、41.73%,其中 N3 组受到的抑制作用更明显,说明高浓度氮肥可能与淀粉酶活性呈负相关关系。外源氮调控对蔗糖酶活性的影响如图 6-D 所示,随氮肥浓度的提升,与 N0 组相比,N2、N3 组蔗糖酶活性显著提升,表明土壤淀粉酶活性与氮肥浓度呈显著正相关。由图 6-E 可知,随氮肥浓度的增加,与 N0 组相比,N1 和 N2 组脱氢酶活性受到显著抑制作用。栽培 34 d 时,N2、N3 组脱氢酶活性无显著差异;栽培 90 d 时,N1、N2、N3 组间均无显著差异。外源氮调控对脂肪酶活性的影响如图 6-F 所示,随氮肥浓度的提升,与 N0 组相比,土壤脂肪酶活性显著提升,N1、N2 和 N3 处理组间有显著差异,脂肪酶活性 $N3 > N2 > N1$ 。

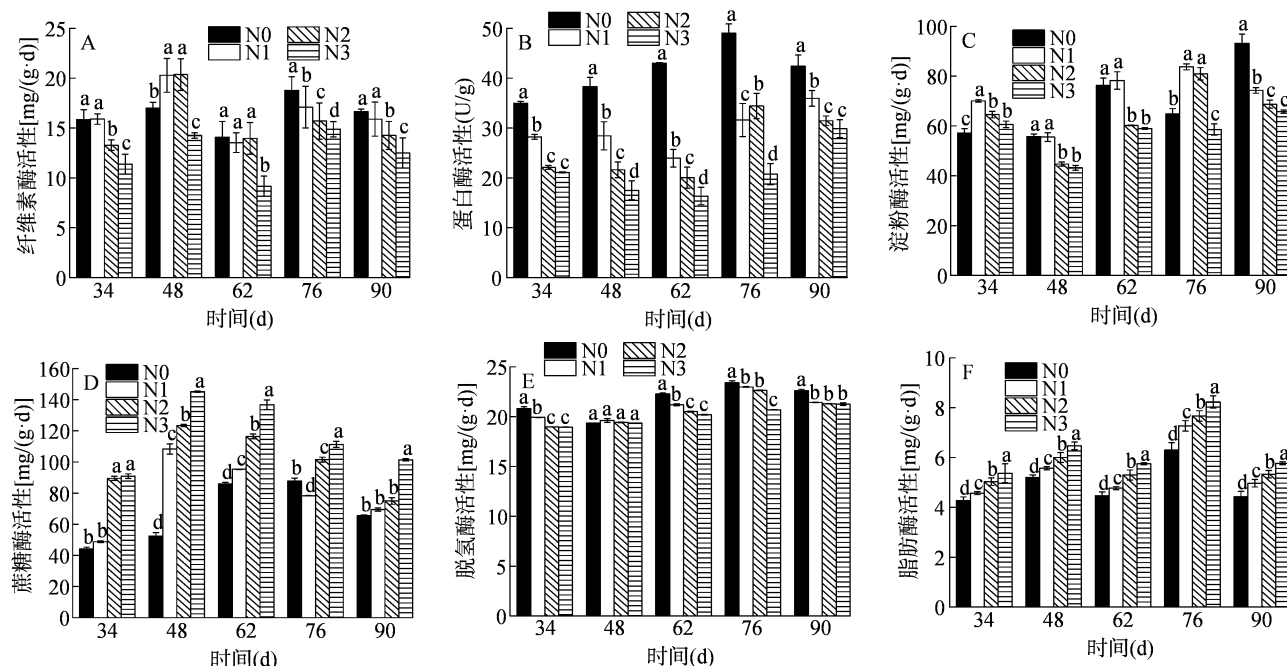


图6 土壤酶活性变化

2.5 土壤理化性质及酶活性与人参皂苷含量的相关关系

2.5.1 相关性分析 不同氮调控处理组下土壤理化性质及酶活性与人参皂苷含量的相关关系见图 7。从图 7-A 可以看出,N0 对照组下,碱解氮含量与 Rb3、Rg3 含量呈显著负相关($P < 0.05$),与 Rf、

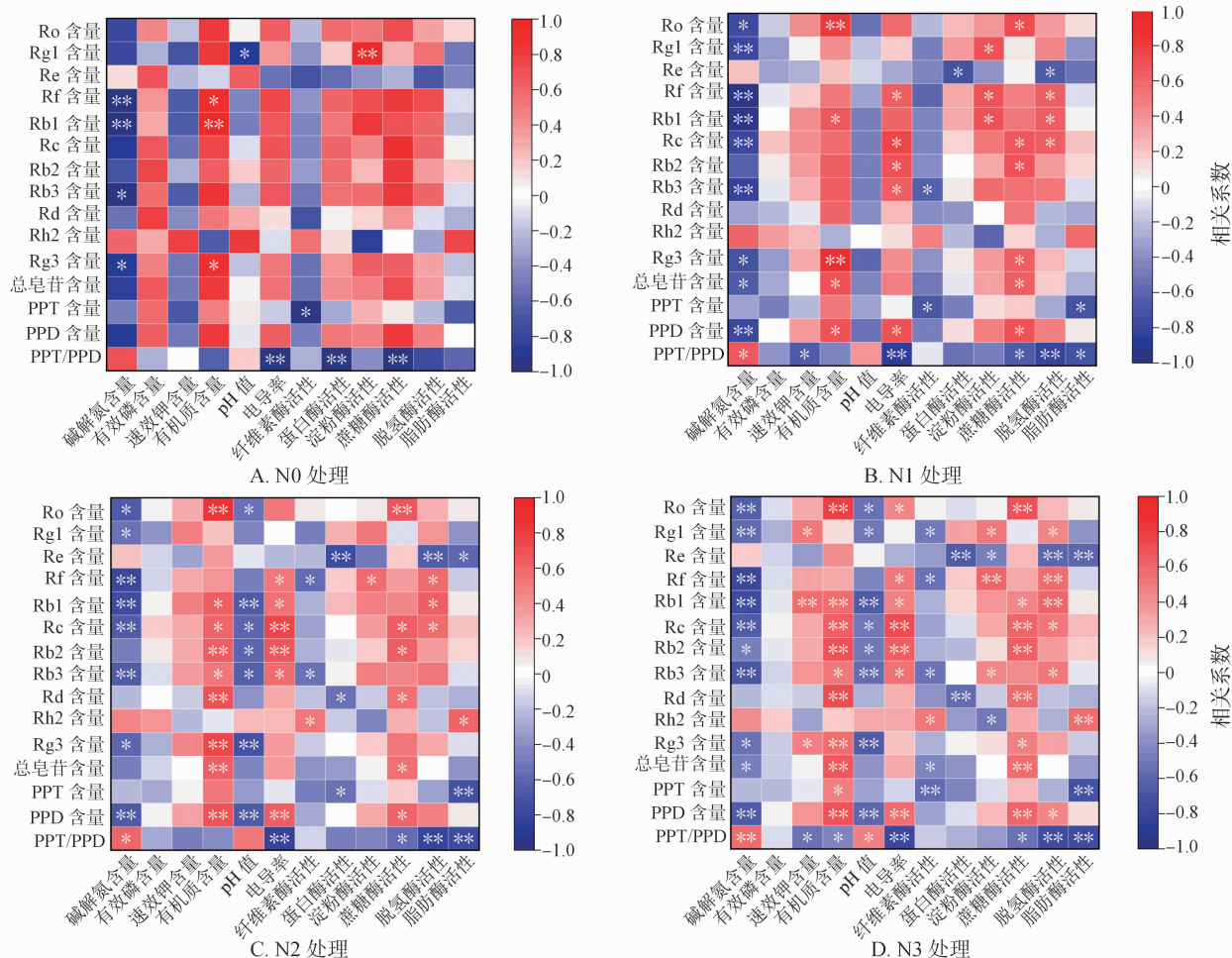
Rb1 含量呈极显著负相关($P < 0.01$),有机质含量与 Rf、Rg3 含量呈显著正相关($P < 0.05$),与 Rb1 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),pH 值与 Rg1 含量呈显著负相关,电导率、蛋白酶和蔗糖酶活性与 PPT/PPD 呈极显著负相关,淀粉酶活性与 Rg1 含量呈极显著正相关($P < 0.01$)。

从图 7-B 中可以看出, N1 处理组下, 碱解氮含量与 Ro、Rg3、总皂苷含量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 Rg1、Rf、Rb1、Rc、Rb3、PPD 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 有机质含量与 Rb1、总皂苷、PPD 含量呈显著正相关, 与 Ro、Rg3 含量呈极显著正相关, 电导率与 Rf、Rb1、Rc、Rb2、Rb3、PPD 含量呈显著正相关, 纤维素酶活性与 Rb3 和 PPT 含量、蛋白酶和脱氢酶活性与 Re 含量呈显著负相关, 淀粉酶活性与 Rg1、Rf、Rb1 含量, 蔗糖酶活性与 Ro、Rc、Rb2、Rg3、总皂苷、PPD 含量, 脱氢酶活性与 Rf、Rb1 和 Rc 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

从图 7-C 中可以看出, N2 处理下, 碱解氮含量与 Ro、Rg1、Rg3 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 Rf、Rb1、Rc、Rb3、Rg3、PPD 含量呈极显著负相关。有机质含量与 Rb1、Rc、Rb3 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Ro、Rb2、Rd、Rg3、总皂苷、PPD 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), pH 值与 Ro、Rc、Rb2、Rb3 含量呈显著负相关, 与 Rb1、Rg3、PPD 含量呈极

显著负相关 ($P < 0.01$), 电导率与 Rf、Rb1、Rb3 含量呈显著正相关, 与 Rc、Rb2、PPD 含量极显著正相关 ($P < 0.01$), 纤维素酶活性与 Rh2 含量呈显著正相关, 与 Rf、Rb3 含量呈显著负相关, 蛋白酶活性与 Rd、PPT 含量呈显著负相关, 与 Re 含量呈极显著负相关, 淀粉酶活性与 Rf 含量呈显著正相关, 脱氢酶活性与 Rf、Rb1、Rc 含量呈显著正相关, 与 Re 含量、PPT/PPD 呈极显著负相关, 脂肪酶活性与 Re 含量呈显著负相关, 与 PPT/PPD 呈极显著负相关。

从图 7-D 中可以看出, N3 处理下, 碱解氮含量与 Rb2、Rg3、总皂苷含量呈显著负相关, 与 Ro、Rg1、Rf、Rb1、Rc、Rb3、PPD 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 速效钾含量与 Rg1 含量、有机质含量与 Rb3、PPT 含量均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而有机质含量与 Rb1、Rc、Rb2、Rd、Rg3、总皂苷、PPD 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), pH 值与 Ro、Rg1、Rc、Rb2 含量呈显著负相关, 与 Rb1、Rb3、Rg3 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 电导率与 Ro、Rf、Rb1、Rb3



*, ** 分别表示相关性在 0.05、0.01 水平上显著

图7 人参皂苷含量与土壤理化性质及酶活性的相关性

含量呈显著正相关,与 Rc、Rb2、PPD 含量呈极显著正相关($P<0.01$),纤维素酶活性与 PPT 含量,蛋白酶、脱氢酶活性与 Re 含量均呈极显著负相关($P<0.01$),蔗糖酶活性与 Rc、Rb2、Rd、总皂苷、PPD 含量呈极显著负相关($P<0.01$),脂肪酶、脱氢酶活性与 Re 含量和 PPT/PPD 呈极显著负相关($P<0.01$)。由此可知,碱解氮含量对人参皂苷含量呈负相关作用,人参在氮肥调控下,有机质含量、脱氢酶活性降低,这可能是高氮环境使土壤微生物的数量和活性受到抑制,因此增加了有机质的消耗,从而抑制了根系对氮的吸收,导致 N2、N3 处理组的人参皂苷含量低于 N1 和 N0。

2.5.2 灰色关联度分析 分别以不同人参皂苷为母因素,以理化性质和土壤酶活性为子因素对原始数据标准化后,进行灰色关联度分析,表 3 为 N0 对照组下的灰色关联度分析。研究结果表明,人参皂

苷与理化性质的灰色关联度为 0.475~0.922,人参皂苷与土壤酶活性的灰色关联度为 0.531~0.843。表 4 为 N1 处理组下的灰色关联度分析,研究结果表明人参皂苷与理化性质的灰色关联度为 0.433~0.897,人参皂苷与土壤酶活性的灰色关联度为 0.581~0.861。表 5 为 N2 处理组下的灰色关联度分析,研究结果显示人参皂苷与理化性质的灰色关联度为 0.520~0.796,人参皂苷与土壤酶活性的灰色关联度为 0.456~0.768。表 6 为 N3 处理组下的灰色关联度分析,研究结果表明人参皂苷与理化性质的灰色关联度为 0.525~0.788,人参皂苷与土壤酶活性的灰色关联度为 0.489~0.858。综上所述,N0 对照组下 Rb1 含量与有机质含量的灰色关联度最高,为 0.922;N1 处理组下 Rb1 含量与速效钾含量的灰色关联度最高,为 0.897。

表 3 N0 对照组下的灰色关联度分析

人参皂苷	灰色关联度											
	碱解氮含量	有效磷含量	速效钾含量	有机质含量	pH 值	电导率	纤维素酶活性	蛋白酶活性	淀粉酶活性	蔗糖酶活性	脱氢酶活性	脂肪酶活性
Ro 含量	0.596	0.716	0.707	0.750	0.726	0.648	0.679	0.663	0.612	0.698	0.680	0.613
Rg1 含量	0.557	0.767	0.689	0.837	0.720	0.588	0.658	0.718	0.843	0.578	0.799	0.590
Re 含量	0.776	0.813	0.757	0.723	0.785	0.540	0.692	0.652	0.650	0.594	0.694	0.700
Rf 含量	0.504	0.593	0.601	0.648	0.586	0.719	0.575	0.630	0.658	0.704	0.655	0.531
Rb1 含量	0.583	0.788	0.711	0.922	0.747	0.550	0.679	0.794	0.737	0.587	0.808	0.631
Rc 含量	0.554	0.699	0.704	0.703	0.699	0.548	0.653	0.751	0.700	0.774	0.751	0.632
Rb2 含量	0.615	0.754	0.695	0.696	0.703	0.529	0.657	0.688	0.599	0.720	0.682	0.687
Rb3 含量	0.573	0.647	0.647	0.707	0.647	0.715	0.620	0.663	0.660	0.727	0.686	0.572
Rd 含量	0.637	0.779	0.740	0.720	0.746	0.519	0.685	0.697	0.672	0.682	0.657	0.756
Rh2 含量	0.659	0.618	0.648	0.604	0.624	0.571	0.687	0.610	0.537	0.557	0.626	0.685
Rg3 含量	0.518	0.646	0.608	0.744	0.631	0.584	0.595	0.664	0.665	0.685	0.651	0.555
总皂苷含量	0.584	0.702	0.682	0.740	0.700	0.566	0.653	0.732	0.678	0.742	0.703	0.606
PPT 含量	0.628	0.864	0.814	0.803	0.833	0.546	0.774	0.723	0.682	0.626	0.769	0.669
PPD 含量	0.579	0.754	0.713	0.795	0.741	0.538	0.668	0.787	0.690	0.676	0.728	0.628
PPT/PPD	0.785	0.752	0.850	0.718	0.813	0.475	0.774	0.682	0.608	0.569	0.708	0.742

2.5.3 逐步回归分析 基于相关性分析和灰色关联度分析,通过逐步回归分析筛选不显著变量后,最终以 6 个理化性质和 6 个土壤酶活性为自变量,分别列为碱解氮含量(X_1)、有效磷含量(X_2)、速效钾含量(X_3)、有机质含量(X_4)、pH 值(X_5)、电导率(X_6)、纤维素酶活性(X_7)、蛋白酶活性(X_8)、淀粉酶活性(X_9)、蔗糖酶活性(X_{10})、脱氢酶活性(X_{11})、脂肪酶活性(X_{12}),以人参皂苷为因变量(Y),得出回归方程见表 7,人参皂苷与理化性质和酶活性间

呈现较强的多元相关性,回归模型决定系数 >0.5 ,这说明多元逐步回归的方法可以较好地模拟人参皂苷与理化性质和土壤酶活性之间的关系。

2.5.4 通径分析 为进一步明确逐步回归所确定的理化性质和土壤酶活性对人参皂苷含量作用的大小,进行通径分析,结果如表 8 所示。通径分析可将相关系数分解为直接作用和间接作用,从而清楚地显示各因素的相关关系^[23]。从直接通径系数来看,N0 对照组下,淀粉酶活性对 Rg1 含量的直接通

表 4 N1 处理组下的灰色关联度分析

人参皂苷	灰色关联度											
	碱解氮含量	有效磷含量	速效钾含量	有机质含量	pH 值	电导率	纤维素酶活性	蛋白酶活性	淀粉酶活性	蔗糖酶活性	脱氢酶活性	脂肪酶活性
Ro 含量	0.648	0.433	0.696	0.732	0.705	0.674	0.633	0.682	0.632	0.732	0.679	0.631
Rg1 含量	0.702	0.555	0.834	0.804	0.754	0.666	0.673	0.791	0.778	0.652	0.789	0.676
Re 含量	0.856	0.624	0.751	0.820	0.780	0.685	0.746	0.690	0.730	0.776	0.750	0.728
Rf 含量	0.594	0.520	0.692	0.716	0.675	0.708	0.612	0.690	0.709	0.655	0.671	0.592
Rb1 含量	0.672	0.513	0.897	0.832	0.794	0.690	0.708	0.780	0.799	0.661	0.861	0.724
Rc 含量	0.607	0.494	0.823	0.746	0.673	0.816	0.656	0.655	0.769	0.680	0.776	0.693
Rb2 含量	0.689	0.502	0.802	0.754	0.713	0.805	0.689	0.705	0.683	0.721	0.764	0.725
Rb3 含量	0.606	0.513	0.672	0.686	0.684	0.622	0.618	0.632	0.692	0.713	0.667	0.581
Rd 含量	0.839	0.565	0.778	0.862	0.743	0.702	0.772	0.711	0.736	0.794	0.774	0.751
Rh2 含量	0.738	0.647	0.652	0.626	0.698	0.655	0.698	0.627	0.661	0.645	0.685	0.701
Rg3 含量	0.659	0.459	0.676	0.741	0.676	0.654	0.614	0.696	0.619	0.709	0.660	0.635
总皂苷含量	0.714	0.538	0.803	0.830	0.744	0.738	0.712	0.701	0.711	0.700	0.761	0.754
PPT 含量	0.777	0.585	0.835	0.860	0.823	0.676	0.765	0.757	0.807	0.721	0.835	0.728
PPD 含量	0.676	0.505	0.885	0.851	0.775	0.735	0.724	0.743	0.759	0.730	0.834	0.725
PPT/PPD	0.884	0.622	0.780	0.803	0.861	0.609	0.770	0.733	0.736	0.661	0.806	0.759

表 5 N2 处理组下的灰色关联度分析

人参皂苷	灰色关联度											
	碱解氮含量	有效磷含量	速效钾含量	有机质含量	pH 值	电导率	纤维素酶活性	蛋白酶活性	淀粉酶活性	蔗糖酶活性	脱氢酶活性	脂肪酶活性
Ro 含量	0.601	0.673	0.526	0.666	0.588	0.541	0.603	0.457	0.502	0.656	0.595	0.516
Rg1 含量	0.651	0.660	0.756	0.722	0.583	0.603	0.584	0.697	0.592	0.673	0.668	0.569
Re 含量	0.725	0.762	0.520	0.796	0.754	0.666	0.649	0.479	0.581	0.686	0.652	0.662
Rf 含量	0.670	0.606	0.676	0.728	0.615	0.597	0.629	0.684	0.652	0.668	0.671	0.586
Rb1 含量	0.727	0.571	0.612	0.763	0.602	0.652	0.658	0.554	0.538	0.685	0.769	0.621
Rc 含量	0.692	0.585	0.676	0.754	0.649	0.707	0.700	0.575	0.538	0.670	0.742	0.687
Rb2 含量	0.687	0.603	0.707	0.721	0.650	0.682	0.679	0.574	0.556	0.657	0.732	0.690
Rb3 含量	0.654	0.573	0.706	0.653	0.619	0.598	0.637	0.635	0.710	0.624	0.689	0.589
Rd 含量	0.683	0.751	0.569	0.765	0.685	0.733	0.665	0.548	0.523	0.748	0.664	0.707
Rh2 含量	0.601	0.618	0.528	0.561	0.643	0.598	0.640	0.643	0.620	0.599	0.578	0.640
Rg3 含量	0.630	0.573	0.629	0.605	0.586	0.562	0.519	0.580	0.495	0.545	0.597	0.542
总皂苷含量	0.743	0.635	0.605	0.722	0.678	0.643	0.647	0.598	0.591	0.655	0.745	0.682
PPT 含量	0.758	0.684	0.560	0.710	0.671	0.647	0.578	0.522	0.603	0.652	0.759	0.616
PPD 含量	0.753	0.584	0.657	0.748	0.671	0.706	0.690	0.559	0.534	0.687	0.741	0.659
PPT/PPD	0.747	0.610	0.568	0.610	0.790	0.550	0.601	0.513	0.664	0.524	0.707	0.660

径系数为正值,有机质含量对 Rf 含量,碱解氮含量对 Rb3、Rf、Rb1 含量均为负值,有机质含量对 Rg3 含量为正值,纤维素酶活性对 PPT 含量为负值,电导率对 PPT/PPD 为负值;N1 处理组下,碱解氮含量对 Rb1 含量为负值,有机质含量对 Rg3 含量为正值,速效钾含量对 PPT/PPD 为负值;N2 处理下,有机质含量对 Ro、Rb1 含量为正值,蔗糖酶活性和蛋白酶活

性对 Ro、Re 含量为负值,pH 值对 Rb1、Rb3 含量为负值;N3 处理下,蔗糖酶活性对 Ro 含量为正值,pH 值和碱解氮含量分别对 Ro、Rb1 含量为负值。

从间接途径系数来看,N0 对照组下, X_4 (有机质含量)→(通过) X_1 (碱解氮含量)→Y(Rf)、 X_1 (碱解氮含量)→(通过) X_4 (有机质含量)→Y(Rf)的间接途径系数绝对值位列前 2,分别为 0.775、1.676。

表 6 N3 处理组下的灰色关联度分析

人参皂苷	灰色关联度											
	碱解氮含量	有效磷含量	速效钾含量	有机质含量	pH 值	电导率	纤维素酶活性	蛋白酶活性	淀粉酶活性	蔗糖酶活性	脱氢酶活性	脂肪酶活性
Ro 含量	0.640	0.525	0.565	0.719	0.625	0.559	0.615	0.490	0.554	0.858	0.622	0.559
Rg1 含量	0.561	0.701	0.740	0.651	0.578	0.652	0.515	0.634	0.663	0.644	0.661	0.549
Re 含量	0.757	0.627	0.541	0.736	0.749	0.643	0.648	0.570	0.630	0.713	0.681	0.642
Rf 含量	0.634	0.568	0.630	0.667	0.676	0.626	0.593	0.675	0.772	0.621	0.823	0.542
Rb1 含量	0.645	0.583	0.708	0.727	0.701	0.660	0.558	0.554	0.660	0.736	0.797	0.606
Rc 含量	0.666	0.572	0.747	0.752	0.714	0.730	0.621	0.556	0.608	0.725	0.710	0.712
Rb2 含量	0.641	0.573	0.717	0.733	0.678	0.751	0.608	0.542	0.583	0.720	0.686	0.678
Rb3 含量	0.631	0.596	0.685	0.663	0.648	0.600	0.602	0.626	0.733	0.650	0.715	0.592
Rd 含量	0.714	0.631	0.574	0.788	0.705	0.727	0.647	0.563	0.577	0.737	0.692	0.701
Rh2 含量	0.670	0.656	0.625	0.637	0.664	0.681	0.705	0.656	0.635	0.632	0.664	0.723
Rg3 含量	0.569	0.589	0.581	0.594	0.556	0.529	0.538	0.605	0.528	0.570	0.567	0.548
总皂苷含量	0.710	0.627	0.654	0.721	0.690	0.643	0.669	0.552	0.592	0.729	0.689	0.691
PPT 含量	0.723	0.658	0.576	0.678	0.725	0.655	0.641	0.583	0.636	0.668	0.770	0.644
PPD 含量	0.686	0.588	0.712	0.763	0.725	0.679	0.628	0.565	0.642	0.741	0.778	0.651
PPT/PPD	0.780	0.711	0.551	0.563	0.713	0.541	0.637	0.551	0.596	0.546	0.680	0.689

表 7 各处理下人参皂苷与理化性质和土壤酶活性的逐步回归分析

处理	指标	回归方程	决定系数	F 值	P 值
N0	Rg1 含量	$Y = 0.619X_9 + 0.381$	0.970	48.557	0.006
	Rf 含量	$Y = 7.820 - 3.146X_1 - 3.146X_4$	0.999	536.898	0.020
	Rb1 含量	$Y = 1.560 - 0.560X_1$	0.991	166.107	0.001
	Rb3 含量	$Y = 3.268 - 0.226X_1$	0.939	22.503	0.018
	Rg3 含量	$Y = 3.289X_4 - 2.289$	0.804	12.332	0.030
	PPT 含量	$Y = 1.922 - 0.922X_7$	0.938	22.087	0.018
	PPT/PPD	$Y = 1.924 - 0.924X_8$	0.976	61.008	0.004
N1	Rb1 含量	$Y = 2.027 - 1.027X_1$	0.940	22.889	0.017
	Rg3 含量	$Y = 2.325X_4 - 1.325$	0.883	10.601	0.047
	PPT/PPD	$Y = 2.405 - 1.405X_3$	0.962	37.355	0.009
N2	Ro 含量	$Y = 4.306X_4 - 1.496X_{10} - 1.810$	0.999	884.637	0.001
	Re 含量	$Y = 1.519 - 0.519X_8$	0.910	14.444	0.032
	Rb1 含量	$Y = 1.964 + 0.298X_4 - 1.262X_5$	0.997	192.710	0.005
	Rb3 含量	$Y = 6.141 - 5.141X_5$	0.915	15.432	0.029
N3	Ro 含量	$Y = 1.793 - 1.840X_5 + 1.047X_{10}$	0.999	607.808	0.002
	Rb1 含量	$Y = 3.170 - 2.170X_1$	0.951	28.468	0.013

N2 处理组下, X_4 (有机质含量)→(通过) X_{10} (蔗糖酶活性)→ Y (Ro 含量)、 X_{10} (蔗糖酶活性)→(通过) X_4 (有机质含量)→ Y (Ro 含量), 间接通径系数分别是 -0.881、1.564。 X_4 (有机质含量)→(通过) X_5 (pH 值)→ Y (Rb1 含量)、 X_5 (pH 值)→(通过) X_4 (有机质含量)→ Y (Rb1 含量), 间接通径系数分别是 -0.092、0.229。

N3 处理组下, X_5 (pH 值)→(通过) X_{10} (蔗糖酶

活性)→ Y (Ro 含量)、 X_{10} (蔗糖酶活性)→(通过) X_5 (pH 值)→ Y (Ro 含量), 间接通径系数绝对值位列前 2, 分别是 0.069、-0.157。

由此可推断, 碱解氮含量、有机质含量、pH 值、蔗糖酶活性与 人参皂苷的关联性最大, 其中, 碱解氮含量和 pH 值为负向调控, 有机质含量和蔗糖酶活性为正向调控。

表 8 外源氮调控下的土壤理化性质和酶活性与人参皂苷含量的通径系数

处理	成分 (Y)	变量	与 Y 相关 系数	直接通径 系数	间接通径系数											
					X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
N0	Rg1 含量	X ₉	0.970	0.970												
	Rf 含量	X ₁	-0.982	-1.726				0.775								
		X ₄	0.910	-0.767	1.676											
	Rb1 含量	X ₁	-0.991	-0.991												
	Rb3 含量	X ₁	-0.939	-0.939												
	Rg3 含量	X ₄	0.897	0.897												
	PPT 含量	X ₇	-0.938	-0.938												
	PPT/PPD	X ₆	-0.976	-0.976												
N1	Rb1 含量	X ₁	-0.940	-0.940												
	Rg3 含量	X ₄	0.883	0.883												
	PPT/PPD	X ₃	-0.962	-0.962												
N2	Ro 含量	X ₄	0.886	1.767										-0.881		
		X ₁₀	0.569	-0.995				1.564								
	Re 含量	X ₈	-0.910	-0.910												
	Rb1 含量	X ₄	0.571	0.342					0.229							
		X ₅	-0.941	-0.849				-0.092								
	Rb3 含量	X ₅	-0.915	-0.915												
	Ro 含量	X ₅	-0.537	-0.381										-0.157		
		X ₁₀	0.926	0.857					0.069							
N3		X ₁	-0.951	-0.951												

3 讨论

植物的生长发育与土壤养分含量密切相关^[18],除受自身遗传因素控制外,药用植物生长特性、药效成分与土壤养分也密切相关^[24],药效成分多为次生代谢产物,是植物与环境在长期进化过程中相互作用的结果^[25],更加容易受到外界环境的影响^[26]。氮素是影响植物生理活动的重要生态因素^[27],进入土壤中的氮素有效性不仅受土壤理化性质的影响,根系生物量和形态特征的改变也会影响根系对营养成分的吸收。此外,土壤中的酶活性也是关键因素之一,它不仅影响土壤养分的可用性,还维持了人参根系的微生态环境稳态,这对于植物根系对营养的吸收和整个植物的生长发育至关重要^[28]。

本研究发现,4 种氮浓度下人参土壤理化性质、酶活性与人参皂苷含量之间并不是简单的线性相关关系,它们通过协同作用共同维持人参正常生长。碱解氮含量对人参皂苷是负向作用,有机质含量对氮肥浓度的变化更为敏感,并且对人参皂苷的积累有相似的正向促进作用,说明增加土壤有机质含量,能够有效改善土壤养分,并可促进人参皂苷的积累,这与前人的研究结果^[31]一致。土壤 pH 值

随氮浓度增大而降低,土壤中碱解氮的含量有下降趋势,说明土壤 pH 值对氮元素的变化较为敏感,推测这与氮肥利用率低,在土壤中积累可能会引起土壤酸化问题有关^[24],土壤中有效磷含量随氮浓度增大有所下降趋势。有研究表明氮素含量的增加能促进植物对有效磷和速效钾的吸收^[25],这与本研究相一致。姜勇等发现,在氮素添加后,植物中钾含量也相对增加^[26],说明大量元素中氮与钾可能存在协同作用^[27],同时发现脱氢酶和蔗糖酶对人参皂苷积累起到关键作用,在养分循环和有机物分解中发挥着至关重要的作用^[32],土壤中氮肥浓度过高时会降低脱氢酶、蔗糖酶的活性,并抑制人参皂苷的积累^[29]。

人参中人参皂苷的积累受土壤理化性质和土壤酶活性复杂相互作用的影响^[30]。Pearson 相关性分析、灰色关联度分析表明,N1 处理下,碱解氮含量与人参皂苷含量存在极显著负相关作用,有机质含量、脱氢酶活性与人参皂苷含量存在显著正相关作用,与通径结果相一致。N2 处理下有机质含量、蔗糖酶活性和蛋白酶活性是与人参皂苷含量关联最大的 3 个因子,通径分析结果进一步确定了有机质含量对人参皂苷含量是正向促进作用,N3 处理下蔗

糖酶、脱氢酶活性与人参皂苷含量存在显著正相关作用,说明蔗糖酶、脱氢酶活性对人参皂苷含量的影响是正向促进作用。综合来看,在中、高浓度氮添加下,蔗糖酶、脱氢酶和淀粉酶活性受到明显抑制,与通径分析结果相一致,N₂、N₃ 处理组的人参皂苷含量显著低于 N₁ 处理组,这些酶的活性和多样性不仅会影响体内养分的利用,还会影响人参皂苷有效成分的积累,从而导致人参药材质量上的差异。

4 结论

综上所述,土壤理化性质和土壤酶活性对人参中人参皂苷的积累有重要影响。在 N₁ (0.35 g/kg) 浓度下,栽培人参的人参皂苷含量积累更为明显,土壤营养环境更适宜人参的生长,这为改良后的老参地土壤合理施用氮素肥料提供了科学理论依据。本试验探究了氮肥添加后栽参土壤中营养物质、土壤酶活性的变化,这对于制定有效策略提高人参种植中的人参品质和产量至关重要。未来要阐明这些影响的内在机制,并为人参种植制定精确的土壤管理方法,还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 闫宁,战宇,谢昊臻,等. 不同改土方式对连作人参生长发育的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):120-125.
- [2] 王玲玲. 人参连作障碍影响因素及土壤改良技术研究[D]. 烟台:烟台大学,2016:12-25.
- [3] 盛基峰,李垚,于美佳,等. 氮磷添加对高寒草地土壤养分和相关酶活性的影响[J]. 生态环境学报,2022,31(12):2302-2309.
- [4] 张涛. 人参及其皂苷生物合成对低温的生理生态响应机制研究[D]. 长春:吉林农业大学,2019.
- [5] 袁福香,穆佳,晏晓英,等. 2019/2020 年冬春季长白山区气象条件对人参越冬及幼苗影响分析[J]. 气象灾害防御,2021,28(2):40-44.
- [6] 王响玲,宋柏权. 氮肥利用率的研究进展[J]. 中国农学通报,2020,36(5):93-97.
- [7] 谢忠凯,杨振玲,孙波. 长白山区新林地人参栽培土壤供氮能力研究及管理[J]. 人参研究,2006,18(2):11-13.
- [8] 邵玉钢,郝建勋,臧埔,等. 高效液相色谱法测定农田人参中 9 种人参皂苷单体含量[J]. 食品科学,2012,33(2):189-193.
- [9] 郭双双,杨利民,张一鸣,等. 微波辅助萃取人参总皂苷与单体皂苷含量分析[J]. 食品科学,2015,36(2):1-6.
- [10] 顾艳,梅瑜,徐世强,等. 药用植物连作障碍研究进展[J]. 广东农业科学,2021,48(12):162-173.
- [11] 战宇,苗馨月,王二刚,等. 灭菌方式对人参连作土壤养分及真菌群落结构的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):235-244.
- [12] 范端阳,尹美强,温银元,等. 硝铵氮源配比对谷子苗期生长及氮素利用的影响[J]. 作物杂志,2023(1):96-102.
- [13] 林美霞,苏建霖,朱凡铠,等. 不同施氮量对麻竹光合特性和氮代谢关键酶的影响[J/OL]. 山东农业科学,2024:1-10(2024-04-03)[2024-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1148.S.20240402.1641.009.html>.
- [14] 崔永亮,罗伟,吴航玉,等. 施氮对铜镉污染土壤中大豆植株生长及氮磷钾含量的影响[J]. 资源开发与市场,2023,39(12):1660-1665.
- [15] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:8-9.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:17-38.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:31-47.
- [18] 张行,张辰,王富,等. 人参属三萜皂苷代谢产物多样性形成的进化机制[J/OL]. 分子植物育种,2024:1-12(2024-01-30)[2024-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240129.1649.006.html>.
- [19] 李念奇,逯雨晴,张蕙滢. 数字化进程中林业有害生物生态调控在城市园林的发展与展望[J]. 现代园艺,2024(8):62-64.
- [20] 张亚玉. 不同生长环境下人参根区土壤肥力特性研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [21] 杨炜迪,梁小军,张俊丽. 纤维素酶、有机酸等添加剂对干芦苇发酵品质及饲用价值的影响[J]. 中国饲料,2024(11):161-166.
- [22] 李亚丽,周南丁,李怡燃,等. 基于最小数据集-聚类分析的高寒草甸退化综合评价[J]. 四川农业大学学报,2024(2):430-441.
- [23] 郝佳,刘宇航,殷洁,等. 不同磷浓度对土壤理化性质及防风生长和药材品质的影响[J]. 华南农业大学学报,2022,43(3):59-67.
- [24] Choi J, Bach E, Lee J, et al. Spatial structuring of cellulase gene abundance and activity in soil[J]. Frontiers in Environmental Science,2018,6:107.
- [25] 俞巧钢,叶静,杨梢娜,等. 不同施氮量对单季稻养分吸收及氮挥发损失的影响[J]. 中国水稻科学,2012,26(4):487-494.
- [26] 姜勇,徐柱文,王汝振,等. 长期施肥和增水对半干旱草地土壤性质和植物性状的影响[J]. 应用生态学报,2019,30(7):2470-2480.
- [27] 陈雅茹,韩梅,程林,等. 林下参皂苷含量与生态因子的相关性研究[J]. 中草药,2023,54(8):2588-2595.
- [28] 刘照东,杨林林,张阳,等. 不同产地北柴胡中柴胡皂苷含量与土壤因子的关系[J]. 中草药,2020,51(20):5328-5336.
- [29] 赵雪淞,王力恒,骆世洪,等. 人参根际土壤微生物群落结构与土壤环境因子的关系[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(1):27-35.
- [30] 左湘熙,张亚玉. 土壤特性对人参生长及品质的影响研究进展[J]. 特产研究,2020,42(1):58-63.
- [31] 李珊,黄允智,刘学英,等. 作物氮肥利用效率遗传改良研究进展[J]. 遗传,2021,43(7):629-640.
- [32] Datta R. Enzymatic degradation of cellulose in soil: a review[J]. Heliyon,2024,10(1):e24022.