

万欣,董元华,王辉,等.番茄温室土壤碳氮磷的生态化学计量学特征及其与土壤酶活性的关系[J].江苏农业科学,2013,41(10):281-285.

番茄温室土壤碳氮磷的生态化学计量学特征及其与土壤酶活性的关系

万欣^{1,2},董元华^{1,2},王辉^{1,2},李建刚^{1,2},宋丽芬³,汪海燕^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所/中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室,江苏南京 210008; 2.中国科学院研究生院,北京 100049; 3.中国农业大学(烟台)理工学院,山东烟台 264670)

摘要:以山东省海阳地区不同种植年限番茄温室土壤为供试材料,探讨土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)和速效磷(AP)之间摩尔比以及土壤过氧化氢酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的变化规律。结果表明,在种植 1~14 年间, $n(C):n(N)$ 整体呈降低趋势,其中 5~14 年间趋于稳定。 $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 在种植 1~8 年期间呈明显降低趋势,且变化速率较快,之后的几年间小幅增加。随着种植年限的增加,土壤过氧化氢酶活性增强,与 $n(N):n(AP)$ 的相关性最好;土壤脲酶活性在种植 1~8 年间呈增强趋势,之后开始降低,但与各养分摩尔比间的相关性不显著;酸性磷酸酶活性随种植年限的增加而呈增强并趋于稳定的趋势,与 $n(N):n(AP)$ 间相关性最好。由此认为,造成各指标变化的根本原因在于肥料的投入量和施用肥料的种类,尤其是含磷量较高的肥料的施用。

关键词:温室土壤;养分;酶活性;摩尔比;生态化学计量学

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)10-0281-05

生态化学计量学是近年来新兴的一个生态学研究领域,

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:200903011);中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:KZCX2-YW-JC405、KSCX2-EW-B-6)。

作者简介:万欣(1983—),女,山东兖州人,博士研究生,主要从事生态调控研究。E-mail:wanxin1983@126.com。

通信作者:董元华。E-mail:yhdong@issas.ac.cn。

加了全生育期各土层的铵态氮累计含量,而且使养分释放的高峰持续 1 个月,满足籽实成熟期养分供应。后期肥料养分能够全部释放出来,并及时向下运移补充,使各层土壤铵态氮含量都高于其他处理。整个生育期各层土壤铵态氮累积含量比农民习惯施肥处理增加了 17.50%。

有研究显示,土壤铵态氮浓度增加对硝化反应速度起抑制作用^[14],减氮 20% 的 2 种施肥方式都有效增加了土壤铵态氮含量,尤其是小于 40 cm 土层的铵态氮含量。包膜尿素的施用使铵态氮释放高峰持续 1 个月,更利于被植物吸收利用。

参考文献:

- [1]邢素丽,刘孟朝,邢竹.北方褐土区土壤硝态氮运移动态及合理施肥调控[J].中国土壤与肥料,2007(5):15-18,31.
- [2]吴永成,周顺利,王志敏,等.华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J].生态学报,2005,25(7):1620-1625.
- [3]苏涛,王朝辉,李生秀.水温因素与夏玉米生长季节土壤矿质氮动态的关系[J].土壤通报,2011(4):896-901.
- [4]夏海丰,李楠,高玮,等.树脂包膜控释尿素不同用量对玉米产量的影响及其肥效研究[J].吉林农业大学学报,2007,29(5):518-522.
- [5]马春梅,董守坤,张磊,等.大豆生育期间土壤无机态氮与植株

它可以把生态实体的各个层次在元素水平上统一起来,广泛应用于生态学研究^[1-2]。碳(C)、氮(N)、磷(P)是生物地球化学循环中的重要元素,在生态系统中占有重要地位,因此这 3 种元素的生态化学计量学研究受到生态学家们的普遍关注^[3-4]。目前,一些学者已经应用生态化学计量学对土壤 C、N 和 P 进行研究。Cleveland 等通过收集世界各地土壤理化性质资料发现,世界范围内土壤中 C、N 和 P 的摩尔比为 186:13:1^[5]。Tian 等对中国地域内 2 384 个表层土壤样本

硝态氮变化规律的研究[J].土壤通报,2010(4):942-946.

- [6]李莎,高明,李常军,等.氮磷钾配施对土壤氮素累积及烤烟产量品质的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2007,32(6):104-108.
- [7]王西娜,王朝辉,李生秀.种植玉米与休闲对土壤水分和矿质态氮的影响[J].中国农业科学,2006,39(6):1179-1185.
- [8]高金虎,孙占祥,冯良山,等.秸秆与氮肥配施对辽西旱区土壤酶活性与土壤养分的影响[J].生态环境学报,2012,21(4):677-681.
- [9]赵鹏,陈阜,李莉.秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J].华北农学报,2010,25(3):165-169.
- [10]杨劲峰,崔红光.不同施肥处理对棕壤无机态氮含量的影响[J].安徽农业科学,2007,35(18):5490-5492.
- [11]李东坡,武志杰,梁成华,等.缓释尿素氮肥在玉米苗期的养分释放特点[J].中国土壤与肥料,2007(1):34-37.
- [12]韩文炎,马立锋,石元值,等.茶树控释氮肥的施用效果与合理施用技术研究[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):1148-1155.
- [13]焦晓光,梁文举.施用控释尿素后土壤尿素氮的转化及其对产量的影响[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(4):297-299.
- [14]王改玲,陈德立,李勇.土壤温度、水分和 NH_4^+-N 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(1):1-6.

进行了研究,结果发现,土壤中 C、N 和 P 的摩尔比为 134 : 9 : 1,并且 3 种元素间具有较强的相关性^[6]。但这些研究多针对大尺度的森林和草原,而在具体使用模式下对土壤中 C、N 和 P 进行生态化学计量学研究还较少见。

近年来,国内外设施农业的使用较普遍。土壤养分是土壤肥力的物质基础,而肥料则是土壤养分的主要来源。已有研究证实,不合理地施用肥料会导致温室土壤养分比例失衡,从而引发土壤盐渍化及酸化等问题^[7-9]。土壤酶活性可以反映土壤生物化学过程的方向和强度,对土壤健康具有一定的指示作用^[10]。因此,通过研究温室土壤主要养分 C、N 和 P 的生态化学计量学特征以及土壤酶活性的变化规律,可了解土壤施肥情况对土壤健康状况的影响,从而为设施农业土壤

的平衡施肥提供理论依据。笔者以山东海阳地区不同种植年限的番茄温室土壤为供试材料,探讨土壤中 C、N 和 P 摩尔比与土壤的过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶的关系,以期促进该地区温室蔬菜生产的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 土样采集与处理

山东海阳地区是我国使用温室栽植蔬菜最早的地区之一,温室栽植蔬菜已有近 30 年的历史。据调查,目前该地区温室占地约 3 000 km²,共约 6 万个温室。供试土壤均采自山东省海阳地区的番茄温室。以该地区温室比较集中的 17 个村为采样点,每个村具体施肥情况见表 1。

表 1 17 个采样村的温室土壤施肥情况

采样村	种植年限 (年)	样品数 (份)	施肥情况
靠山村	11	5	猪粪 45 t/hm ² ,复合肥 1.2 t/hm ² ,有机肥 3 t/hm ² ,K ₂ SO ₄ 0.75 t/hm ²
梁家后村	5	2	牛粪 30 t/hm ² ,有机肥 3 t/hm ² ,复合肥 0.375 t/hm ²
休家夯村	3、5	2	鸡粪 22.5 t/hm ² ,生物肥 1.5 t/hm ² ,复合肥 0.75 t/hm ²
刘家村	1、3	3	猪粪 15 t/hm ² ,复合肥 0.75 t/hm ²
纪瞳村	8、11	2	鸡粪 67.5 t/hm ² ,有机肥 2.4 t/hm ² ,微生物有机肥 1.125 t/hm ²
草泊村	14	2	鸡粪 37.5 t/hm ² ,复合肥 1.125 t/hm ²
南茂子村	5	2	鸡粪 22.5 t/hm ² ,复合肥 0.6 t/hm ² ,有机肥 1.8 t/hm ²
北茂子村	8	3	鸡粪 75 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ² ,有机肥 1.5 t/hm ²
阜峰村	3	2	鸡粪 15 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ² ,有机肥 2.25 t/hm ²
岚前坡村	14	2	鸡粪 37.5 t/hm ² ,复合肥 0.9 t/hm ² ,K ₂ SO ₄ 0.75 t/hm ²
后店村	1	2	鸡粪 15 t/hm ² ,复合肥 0.75 t/hm ²
吴家阜村	5、14	2	鸡粪 30 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ² ,有机肥 1.5 t/hm ²
河南庄村	5	2	牛粪 22.5 t/hm ² ,有机肥 3 t/hm ² ,复合肥 0.6 t/hm ²
孙家庄村	14	2	猪粪 37.5 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ² ,有机肥 1.5 t/hm ² ,K ₂ SO ₄ 0.75 t/hm ²
朱坞村	5	2	鸡粪 30 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ²
小荆村	5	3	鸡粪 22.5 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ² ,有机肥 3.75 t/hm ²
茂子集村	11	2	鸡粪 45 t/hm ² ,复合肥 1.5 t/hm ²

注:该地区复合肥的氮磷钾含量均为 15%。

采样时间为 2009 年 8 月,分别采集连作年限为 1、3、5、8、11、14 年的温室土壤样品共 40 份,各种植年限的土壤化学性质见表 2。每个温室土壤按蛇行法确定 5 个采样点,采集番茄根系 0~20 cm 耕层土壤,混合均匀后用四分法约留取 1 kg 土样,过 150 μm 孔径筛保存。

1.2 方法

1.2.1 土壤 C、N 和 P 含量的测定与计算 土壤 pH 值采用 pH 计(*V_水*: *m_土* = 2 mL : 1 g)测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾湿氧化法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定,速效磷含量采用 Olsen 法^[11]测定。C、N 和 P 含量的单位用“mmol/kg”表示,并计算 C、N 和 P 之间的摩尔比。

1.2.2 土壤酶活性的测定^[12] 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,活性单位以 1 g 土样反应 1 h 后消耗的 KMnO₄ 溶液体积来表示;脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,活性单位以 1 g 土样在 37 ℃ 条件下反应 24 h 后水解生成的氨基氮重量来表示;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 2003 软件对试验数据进行处

理并绘图。采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析、非参数 K-W 检验(差异显著性水平设为 0.05)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限温室土壤主要理化性质指标的变化

由表 2、表 3 可知,种植年限为 1 年的温室土壤 pH 值与种植年限为 3、5 年的差异不显著,但与种植年限为 8、11、14 年的土壤 pH 值间差异显著(*P* < 0.05),说明该地区种植年限在 8 年以上的温室土壤酸化现象日益严重。该地区大棚土壤酸化严重的原因主要是该地区长期施用酸性肥料硫酸钾,加之过磷酸钙及氮肥可导致土壤氢离子累积,致使 pH 值降低。

由表 2、表 3 还可知,种植年限为 1~8 年的温室土壤有机碳、全氮、全磷和速效磷含量呈增长趋势,种植年限为 1 年的土壤有机碳、全氮、全磷和速效磷含量与种植年限为 5、8、11 年的差异显著(*P* < 0.05)。当种植年限为 8 年时,各土壤养分含量达到最高;但当种植年限超过 8 年时,土壤全磷和速效磷含量随种植年限的增加呈降低趋势,且差异显著(*P* < 0.05),但不同种植年限土壤有机碳和全氮含量间差异不显著(*P* > 0.05)。在种植初期土壤有机碳和全氮含量的增加主

表 2 山东海阳地区不同种植年限温室土壤的主要化学性质

种植年限	样品数 (份)	pH 值	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)
1	4	5.88±0.5	7.87±1.1	0.61±0.1	197.4±20	28.0±4
3	4	5.55±0.6	9.14±0.9	0.81±0.3	342.8±25	39.3±7
5	13	5.41±0.4	10.25±1.0	1.22±0.2	1 972.7±159	207.7±25
8	4	5.31±0.3	14.70±1.2	1.73±0.3	18 033.3±282	1 107.5±231
11	8	5.22±0.4	13.81±1.3	1.48±0.4	2 184.6±152	706.1±89
14	7	4.99±0.5	9.38±0.9	1.12±0.3	3 822.2±173	621.1±81

表 3 不同种植年限温室土壤化学指标的 K-W 非参数检验结果

种植年限 (年)	P				
	pH 值	有机碳	全氮	全磷	速效磷
1 和 3	0.386	0.248	0.386	0.021	0.043
1 和 5	0.113	0.003	0.003	0.003	0.003
1 和 8	0.043	0.021	0.021	0.021	0.021
1 和 11	0.017	0.007	0.007	0.006	0.006
1 和 14	0.038	0.038	0.038	0.008	0.008
3 和 5	0.821	0.113	0.023	0.003	0.003
3 和 8	1.000	0.021	0.021	0.021	0.021
3 和 11	0.496	0.007	0.027	0.006	0.006
3 和 14	0.131	0.571	0.257	0.008	0.008
5 和 8	0.865	0.003	0.007	0.003	0.003
5 和 11	0.246	0.000	0.218	0.000	0.000
5 和 14	0.043	0.052	0.428	0.000	0.000
8 和 11	0.610	0.234	0.308	0.006	0.006
8 和 14	0.345	0.008	0.059	0.008	0.008
11 和 14	0.487	0.001	0.082	0.001	0.105

要是因为前期有机肥料和氮肥的投入;后期由于高温、高湿的大棚环境加速了土壤有机碳和氮的分解,有机碳和全氮含量并没有随种植年限的增加而变化。由表 1 还可知,种植年限为 8 年的 4 个样点主要分布在纪疃村和北茂子村,与其他样点相比,2 地施肥量均较高,因此造成种植年限为 8 年的温室土壤氮和磷含量较高。

表 4 山东海阳地区不同种植年限温室土壤中 C、N 和 P 的摩尔比

种植年限 (年)	样品数 (份)	$n(C):n(N)$	$n(C):n(P)$	$n(N):n(P)$	$n(C):n(AP)$	$n(N):n(AP)$
1	4	15.1±0.9	103.0±5.0	6.8±0.2	726.1±8	48.2±0.7
3	4	13.2±1.9	68.9±4.0	5.2±0.5	600.8±10	45.6±1.2
5	13	9.8±2.4	13.4±2.0	1.4±0.1	127.5±8	13.0±2.0
8	4	9.9±1.7	2.1±0.1	0.2±0.02	34.3±3	3.5±1.0
11	8	10.9±1.4	4.2±2.5	1.5±0.10	50.5±4	4.6±0.5
14	7	9.8±1.2	6.3±0.4	0.6±0.04	39.0±3	4.0±0.2

由表 4、表 5 可知,种植年限在 1~14 年间, $n(C):n(N)$ 整体呈降低趋势,其中 5~14 年间差异不显著($P>0.05$),趋于稳定。这说明在温室使用初期,由于氮肥施用量增加,土壤氮的积累速率超过了碳的积累速率,种植年限超过 5 年后,土壤中碳和氮的积累速率趋于一致,因此 $n(C):n(N)$ 在种植年限为 5~14 年的土壤达到一个稳定的水平。

$n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 在种植年限为 1~8 年间呈明显降低趋势,且差异显著($P<0.05$),变化速率较快,当种植年限为 8 年时,

值得注意的是,海阳地区各种种植年限的温室土壤全磷及速效磷含量间差异显著($P<0.05$),而且富集最为明显,主要是因为过量施用磷肥及含磷量大的复合肥,从而直接导致土壤磷的富集。从每个村具体施肥情况(表 1)可知,多数农户施用动物粪便且施用量在 15 t/hm^2 以上,而动物饮食和生理因素使其粪便含磷量很高^[13]。植物对磷的吸收率较低,一般在 10%~25%,所以土壤中磷残留量也会增加,势必造成土壤养分失衡。而速效磷含量在种植年限为 8 年以上的温室土壤中开始减少,其原因可能是土壤酶活性在起作用^[14],具体机制尚有待进一步研究。

2.2 不同种植年限温室土壤 C、N 和 P 的摩尔比

不同种植年限温室土壤 C、N 和 P 摩尔比见表 4。取不同种植年限比值的算术平均值可以得出,该地区温室土壤 $n(C):n(N)$ 、 $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 的分别为 11.37、3.263、20, $n(C):n(N):n(P)$ 平均为 33:3:1。这与中国地域内表层土壤(0~10 cm)中 $n(C):n(N):n(P)$ 为 134:9:1 完全不同^[6]。这是因为温室大棚土壤受人为干扰较严重,含磷量较高的粪肥施用量过多(表 1),导致土壤养分中磷含量偏高(表 2),土壤养分比例严重失衡。而中国地域内表层土壤 $n(C):n(N):n(P)$ 是综合全国各种利用类型土壤 $n(C):n(N):n(P)$ 的平均值。因此,大棚土壤 $n(C):n(N):n(P)$ 与中国地域内表层土壤 $n(C):n(N):n(P)$ 完全不同。

各指标达到最低,之后的几年间小幅增加。其中,种植年限 8、11 年土壤样品中 $n(C):n(P)$ 和 $n(N):n(AP)$ 差异不显著, $n(N):n(P)$ 和 $n(C):n(AP)$ 差异极显著($P<0.01$);种植年限 8、14 年土壤样品中,除 $n(N):n(AP)$ 差异不显著外, $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 差异显著($P<0.05$);种植年限 11、14 年土壤样品中, $n(C):n(P)$ 差异不显著, $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 差异显著($P<0.05$)。各指标随种植年限的变化趋势表明,温室土壤磷和速效磷的积累速率比碳和氮的积累速率快得多。造成温

表 5 不同种植年限温室土壤 C、N 和 P 摩尔比的
K - W 非参数检验结果

种植年限 (年)	P				
	$n(C):n(N)$	$n(C):n(P)$	$n(N):n(P)$	$n(C):n(AP)$	$n(N):n(AP)$
1 和 3	0.149	0.021	0.021	0.021	0.021
1 和 5	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
1 和 8	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
1 和 11	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
1 和 14	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
3 和 5	0.031	0.003	0.003	0.003	0.003
3 和 8	0.043	0.021	0.021	0.021	0.021
3 和 11	0.062	0.007	0.007	0.007	0.007
3 和 14	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
5 和 8	1.000	0.003	0.003	0.003	0.003
5 和 11	0.148	0.000	0.017	0.000	0.000
5 和 14	0.782	0.000	0.000	0.000	0.000
8 和 11	0.396	0.126	0.007	0.007	0.062
8 和 14	1.000	0.008	0.008	0.038	0.450
11 和 14	0.132	0.132	0.001	0.001	0.015

室土壤磷富集的根本原因是不合理的施肥模式,即当地农户在施肥过程中施用了大量富含磷的动物粪便及含磷量高的复合肥料,导致温室土壤磷含量随种植年限的增加而增加,而有机肥和氮肥的施用量相对磷肥来说较少,土壤碳和氮的积累速率相对较慢。因此,这 4 个比值在种植年限为 1~8 年的土壤中逐渐降低;当种植年限为 8 年时,施肥量的增加导致土壤磷含量的增加速率达到顶峰,各比值相应降低到最小值;但在种植年限为 8 年以后,有机碳、全氮、全磷和速效磷含量均呈降低趋势(表 2),其中全磷和速效磷的降低速率超过有机碳和全氮的降低速率,这 4 个比值略有波动。

2.3 不同种植年限温室土壤酶活性的变化规律

一般认为,土壤酶活性是土壤代谢作用强度的标志。过氧化氢酶能解除由生物呼吸和有机物生物化学反应而产生的过氧化氢的毒害,参与土壤中物质和能量转化,其活性与土壤有机质及土壤理化性状密切相关^[15]。由图 1 可知,过氧化氢酶活性为 0.13~0.78 mL/g,随着种植年限的增加,温室土壤过氧化氢酶活性有所增强。将测定结果与文献[16-18]进行比较来看,该地区温室土壤过氧化氢酶活性普遍偏弱,可能会影响温室土壤的解毒能力。

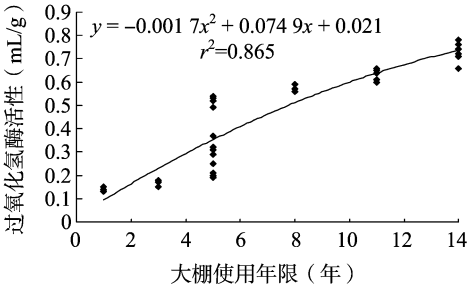


图 1 不同种植年限对温室土壤过氧化氢酶活性的影响

脲酶是催化尿素水解的酶,提高其活性,有利于土壤有机氮向有效氮转化,从而提高土壤中氮素的供应水平。由图 2 可知,脲酶活性为 4.01~5.56 mg/g,前 8 年呈增加趋势,之后

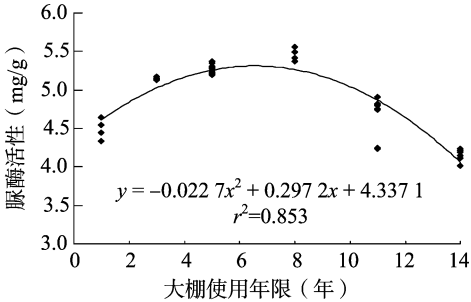


图 2 不同种植年限对温室土壤脲酶活性的影响

开始降低,该变化趋势与土壤氮的变化趋势相一致。

磷酸酶是植物根系与微生物的分泌产物,能促进土壤中有机磷化合物水解,在土壤磷素转化中起一定作用,因此其活性越高,土壤中释放的磷酸就越多,有利于作物对磷的吸收和利用^[17]。由图 3 可知,酸性磷酸酶活性为 1.54~9.67 mg/g,呈逐年增加并趋于稳定的变化趋势,且整体变化幅度较大,由此也印证了温室土壤较为明显的磷富集现象。

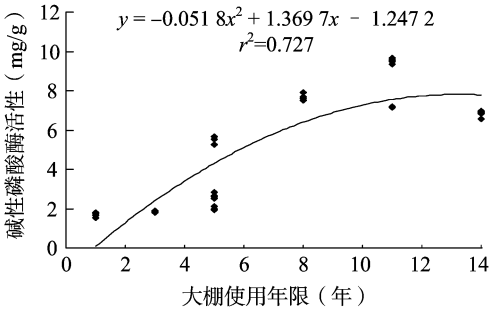


图 3 不同种植年限温室土壤酸性磷酸酶活性变化趋势

2.4 土壤酶活性与 C、N 和 P 摩尔比的相关性分析

由表 6 可知,土壤中 C、N、P 各摩尔比以及过氧化氢酶活性与酸性磷酸酶活性均在 0.01 水平上呈显著正相关关系,脲酶活性分别与过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性相关但不显著。此外,过氧化氢酶活性分别与 $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 在 0.05 或 0.01 水平上呈显著负相关关系,其中与 $n(N):n(AP)$ 相关性最好(相关系数 = -0.927^{**})。有研究表明,土壤中过氧化氢酶活性与土壤磷的转化关系密切,对土壤中主要营养物质氮素的转化也具有重要作用^[19]。由表 2、表 4 和图 1 可知,该地区土壤磷含量的变化逐年增加,导致 $n(N):n(AP)$ 变化也较大,土壤过氧化氢酶活性也逐年增强。因此,过氧化氢酶活性与 $n(N):n(AP)$ 密切相关。脲酶活性与各养分摩尔比间呈相关关系,但不显著。脲酶能促进尿素水解产生氨,只对土壤中氮素形态起转化作用,对土壤中氮素的总量没有作用,因此各养分摩尔比与其活性相关性不大。酸性磷酸酶活性分别与 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 在 0.05 水平上呈显著负相关关系,其中与 $n(N):n(AP)$ 相关性最好(相关系数 = -0.881^{*})。有研究表明,土壤磷酸酶活性依赖于植物中速效磷的含量,土壤中速效磷含量越高,则磷酸酶活性也应相应提高^[20]。由表 2、表 4 和图 3 可知,随着种植年限的延长,该地区土壤中有效磷含量变化较大,导致 $n(N):n(AP)$ 变化较大,土壤酸性磷酸酶活性也有逐年增强的趋势,因此,酸性磷酸酶活性与 $n(N):n(AP)$ 密切相关。

表 6 土壤酶活性与土壤养分含量之间的相关性分析

指标	相关系数					过氧化氢酶活性	脲酶活性	酸性磷酸酶活性
	$n(C):n(N)$	$n(C):n(P)$	$n(N):n(P)$	$n(C):n(AP)$	$n(N):n(AP)$			
$n(C):n(N)$	1.000							
$n(C):n(P)$	0.969 **	1.000						
$n(N):n(P)$	0.966 **	0.997 **	1.000					
$n(C):n(AP)$	0.961 **	0.967 **	0.981 **	1.000				
$n(N):n(AP)$	0.932 **	0.938 **	0.959 **	0.995 **	1.000			
过氧化氢酶活性	-0.805	-0.838 *	-0.866 *	-0.905 *	-0.927 **	1.000		
脲酶活性	-0.208	-0.214	-0.187	-0.087	-0.031	-0.261	1.000	
酸性磷酸酶活性	-0.689	-0.789	-0.826 *	-0.850 *	-0.881 *	0.926 **	-0.106	1.000

注: *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上相关显著。

3 结论

该地区温室土壤中 $n(C):n(N)$ 、 $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 、 $n(N):n(AP)$ 分别为 11、37、3、263、20、 $n(C):n(N):n(P)$ 为 33:3:1。 $n(C):n(N)$ 在种植年限为 1~14 年的土壤中整体呈降低趋势,其中在种植年限为 5~14 年的土壤中趋于稳定。 $n(C):n(P)$ 、 $n(N):n(P)$ 、 $n(C):n(AP)$ 和 $n(N):n(AP)$ 在种植年限为 1~8 年的土壤中呈明显降低的趋势;当种植年限为 8 年时,各指标达到最低;之后的几年间小幅增加。

随着种植年限的增加,土壤过氧化氢酶活性增强,且与 $n(N):n(AP)$ 相关性最好;脲酶活性在温室使用前 8 年呈增强趋势,之后开始减弱,但与各养分摩尔比的相关不显著;酸性磷酸酶活性随种植年限的增加而呈逐渐增强并趋于稳定的趋势,与 $n(N):n(AP)$ 相关性最好。笔者认为,导致土壤酶活性变化的根本原因是肥料的投入量和所施用肥料的种类,尤其是含磷量较高的肥料的施用。因此,在今后的农业生产中,应严格控制肥料的投入,并做到平衡施肥。

参考文献:

- [1] Sterner R W, Elser J J. All life is chemical[J]. Bioscience, 2003, 53(5): 521-524.
- [2] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, 46(3): 205-211.
- [3] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [4] Sterner R W, Elser J J, Vitousek P, et al. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: princeton university press, 2002.
- [5] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [6] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/2/3): 139-151.
- [7] 郭文龙, 党菊香, 吕家珑, 等. 不同年限蔬菜大棚土壤性质演变与施肥问题的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 85-89.
- [8] 刘艳军, 姜勇, 梁文举, 等. 蔬菜温室土壤某些化学性质的演变特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2218-2220.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [10] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 162-171.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-292.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 7-60.
- [13] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5508-5515.
- [14] 李美茹, 张光民, 郭丽娜. 廊坊市番茄大棚土壤肥力与土壤酶活性关系初探[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(16): 6864-6865.
- [15] Chang J, Wu X, Liu A Q, et al. Assessment of net ecosystem services of plastic greenhouse vegetable cultivation in China[J]. Ecological Economics, 2011, 70(4): 740-748.
- [16] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic Carbon fractions and management index after 20 years of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 163-169.
- [17] 任勃, 杨刚, 谢永宏, 等. 洞庭湖区不同土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 8-11.
- [18] 李俊华, 沈其荣, 褚贵新, 等. 氨基酸有机肥对棉花根际和非根际土壤酶活性和养分有效性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 277-284.
- [19] 李跃林, 彭少麟. 桉树人工林地土壤酶活性与营养元素含量关系研究[J]. 福建林业科技, 2002, 29(3): 6-9, 29.
- [20] 孙波, 赵其国, 张桃林, 等. 土壤质量与持续环境: III. 土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤, 1997(5): 225-234.