

湖北省几种农业土壤中酚含量及其与碳氮的关系

王米兰, 胡荣桂*

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 土壤中的酚类物质是有机碳的重要组成部分, 对微生物驱动下的土壤有机质周转、二氧化碳等温室气体的排放以及土壤养分的供应等有重要意义。为探讨不同农业利用方式对土壤酚类物质的影响, 揭示土壤酚类与土壤性质的关系, 我们采集了湖北省境内几种不同的农业土壤, 分析了土壤酚类以及铵态氮、硝态氮、全氮、有机质含量等。结果显示: 不同土壤的酚类含量变化范围为 45.64~198.48 mg C·kg⁻¹, 且不同农业土壤的酚类含量存在差异, 其含量大小为菜地>水田>旱地>林地, 这与不同的农业利用方式有关; 相同农业利用的土壤酚类含量也不尽相同, 主要受土壤质地和 pH 值的影响所致。相关分析表明: 土壤酚类含量与铵态氮含量、全氮含量和有机质含量呈显著正相关关系, 这与酚类对土壤氮转化过程的影响、酚类共价绑定有机氮以及酚类抑制土壤微生物和土壤酶活性有关。逐步回归分析结果显示: 土壤全氮含量高有利于酚类物质的积累, 而土壤砂粒含量多时酚类含量则较少。这些结果表明: 土壤全氮有利于酚类物质在土壤中的积累, 进而影响土壤的氮转化过程, 减缓土壤有机质的矿化分解, 对土壤碳氮循环有着重要调节作用。

关键词: 土壤酚类; 农业利用方式; 氮含量; 有机质矿化

中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2014)04-0702-06 **doi:** 10.11654/jaes.2014.04.012

Phenol Content and Its Relationships with Carbon and Nitrogen in Several Agricultural Soils in Hubei Province, China

WANG Mi-lan, HU Rong-gui*

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Phenols, a part of soil organic matter, play important roles in soil organic matter turnover, greenhouse gas emissions and soil nutrient supply. This study investigated the contents of phenols, ammonium, nitrate, total nitrogen and organic matter in fifteen soils under different land uses in Hubei Province. Phenol contents in different soils ranged from 45.64 mg C·kg⁻¹ to 198.48 mg C·kg⁻¹ (expressed as carbon content), with order of vegetable soils>paddy soils>upland soils>woodland soils. Soil texture and pH influenced phenol contents. Phenol accumulated in soils was positively correlated with soil ammonium nitrogen, total nitrogen and organic matter, but negatively with soil sand contents. Our research implies that soil phenols may affect soil nitrogen transformation and mitigate soil organic matter mineralization.

Keywords: soil phenol; land use type; nitrogen content; organic matter

大气中温室气体浓度升高导致的全球气候问题倍受人们关注, 给全球经济可持续发展和生态环境安全带来了巨大挑战。土壤被看作是大气碳的源或汇, 土壤有机碳的变化直接影响着大气中 CO₂ 浓度^[1]。农业土壤是温室气体重要排放源^[2], 不同农业利用的土壤温室气体排放不同。此外, 由于世界人口的日益

剧增, 粮食短缺已成为制约人类生存发展的重要问题, 故与此相关的土壤肥力衰退问题也越来越受到人们的重视。因此, 农业土壤的碳氮转化和温室气体排放已成为人们研究的热点问题之一。

土壤中的酚类物质主要由植物释放, 以及植物残体和凋落物分解产生^[3]。由于酚类物质的难降解性, 其在土壤中的积累会影响土壤的碳氮转化和温室气体排放^[4]。如 Freeman 等^[5]在泥炭湿地中的研究指出, 低氧能够抑制酚氧化酶的活性从而促进酚类物质的积累, 进而使土壤有机质矿化受到抑制, 减少温室气体的排放并增加有机碳的积累。近年来, 许多研究认为土壤肥力衰退与土壤中酚类物质的积累有关。因为酚

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171212); 教育部创新团队课题(IRT1247)

作者简介: 王米兰(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤碳氮转化和温室气体排放研究。E-mail: milanw@163.com

* 通信作者: 胡荣桂 E-mail: rghu@mail.hzau.edu.cn

类物质是土壤有毒物质的主要成分之一,其在土壤中的积累会引起植物的化感效应,造成土壤中毒和肥力衰退等问题^[6]。此外,Olk等^[7]的研究则表明,在长期种植水稻的土壤中,稻草的厌氧降解会导致土壤中酚类的累积,酚类物质的积累则会抑制土壤有机氮的矿化从而影响土壤氮素的供应,最终严重影响水稻产量。可见,酚类物质对土壤有机质矿化和养分循环有着重要影响。

目前为止,对土壤酚类物质的研究相对较少,特别是对于不同农业利用土壤酚类物质的积累及其与有机碳稳定性的关系和对氮素含量的影响研究更加薄弱。为此,我们设计了本次试验,试图通过对不同农业土壤的研究来揭示:(1)不同农业利用方式对土壤酚类含量的影响;(2)酚类含量与土壤性质如氮、有机质等含量之间的关系。

1 材料与方法

1.1 采样

随机选取湖北省荆门、黄冈、咸宁、秭归等市县作为采样区。根据农业利用方式分别采得菜地土、水田土、旱地土、林地土、果园土5种土壤,每个采样点采集10~15个小样点混合为一个样品,样品均取自表层20 cm的土壤。各供试土壤的基本状况和理化性质详见表1。

1.2 分析方法

土壤铵态氮用2 mol·L⁻¹ KCl浸提,靛酚蓝可见分

光光度法测定^[8];土壤硝态氮用2 mol·L⁻¹ KCl浸提,紫外分光光度法测定^[9];土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定^[8];土壤有机质采用重铬酸钾-外加加热法测定^[8];土壤pH采用奥力龙868型pH计测定^[10];土壤质地采用吸管法测定,样品前处理参照《中华人民共和国农业行业标准》土壤检测第3部分^[11]。

土壤酚类物质的测定采用Folin-Ciocalteu方法(福林法)。主要操作步骤如下:称取5 g土样于50 mL离心管中,加入1 mol·L⁻¹ NaOH 10 mL振荡30 min,2500 r·min⁻¹离心10 min,取1 mL上清液于10 mL玻璃比色管中,加入2% Na₂CO₃溶液2.5 mL和1 mol·L⁻¹ Folin-Ciocalteu试剂(Sigma)0.5 mL,定容摇匀,静置1 h后于750 nm处测定吸光值^[12-13]。用单宁酸作为标准溶液绘制标准曲线,以相同的方法测定吸光值。

1.3 统计分析

使用SAS 8.1和Excel 2003对数据进行统计分析,采用Pearson相关分析法分析酚类含量和土壤性质的关系,显著水平定为 $P < 0.05$,并对土壤酚类物质含量与土壤各理化性质做逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤的酚类含量

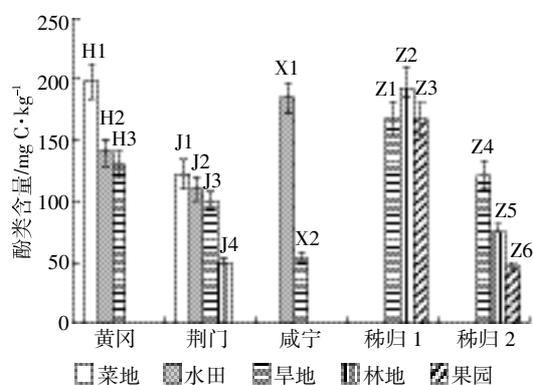
不同土壤的酚类含量变化范围为45.64~198.48 mg C·kg⁻¹(以碳含量计算,图1)。其中,以采自黄冈的菜地土H1酚类含量最高,采自秭归的果园土Z6酚类含量最低。不同农业利用土壤的酚类含量有所差

表1 供试土壤基本状况与理化性质
Table 1 Basic properties of different soils

采样编号	农业利用方式	采土坐标	种植作物	铵态氮/ mg·kg ⁻¹	硝态氮/ mg·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	pH值	质地		
									粉粒/%	粘粒/%	砂粒/%
H1	菜地	30°00'09"N, 115°53'50"E	白菜-土豆	7.11	5.26	24.97	1.78	6.81	65.47	26.85	7.68
H2	水田	30°02'54"N, 115°53'49"E	水稻-油菜	7.79	5.15	34.11	1.64	5.24	59.06	35.83	5.11
H3	旱地	30°01'12"N, 115°53'19"E	油菜-棉花	4.23	4.52	20.20	1.03	5.68	30.91	33.36	35.73
J1	菜地	30°49'24"N, 112°52'49"E	辣椒-白菜	6.15	21.84	22.56	1.13	7.53	68.24	25.79	5.97
J2	水田	30°49'32"N, 112°53'04"E	水稻-油菜	3.82	1.46	22.89	0.95	4.97	61.49	32.78	5.73
J3	旱地	30°49'56"N, 112°53'13"E	油菜-棉花	4.89	3.12	24.53	0.80	5.31	56.32	28.94	14.74
J4	林地	30°51'02"N, 112°53'14"E	马尾松	5.59	1.82	14.70	0.96	7.12	32.85	16.85	50.30
X1	水田	30°13'33"N, 114°25'47"E	水稻-油菜	15.49	12.81	37.46	1.72	4.59	63.74	30.52	5.74
X2	旱地	30°12'31"N, 114°22'01"E	花生-油菜	5.01	2.36	16.08	0.78	5.46	25.39	34.93	39.68
Z1	旱地	30°21'49"N, 111°25'37"E	红薯-油菜	6.18	5.70	29.10	1.50	6.21	56.84	38.26	4.90
Z2	林地	30°47'06"N, 110°57'20"E	马尾松	9.28	2.13	29.98	1.27	5.13	62.87	27.79	9.34
Z3	果园	30°47'17"N, 110°56'50"E	柑桔	12.28	16.86	22.90	1.44	4.98	64.93	28.65	6.42
Z4	旱地	30°42'38"N, 111°18'50"E	红薯-油菜	7.77	20.12	20.80	1.05	6.42	33.49	32.83	33.68
Z5	林地	31°04'38"N, 110°41'10"E	马尾松	4.68	1.86	14.60	0.84	8.64	28.72	14.95	56.33
Z6	果园	31°04'39"N, 110°41'03"E	柑桔	6.53	1.91	9.11	0.54	8.56	24.56	12.48	62.96

注:H代表黄冈;J代表荆门;X代表咸宁;Z代表秭归。下同。

异,综合来看(采自秭归的土样除外),土壤酚类含量大小为菜地>水田>旱地>林地。相同农业利用土壤的酚类含量也明显不同,以采自秭归的土样为例:旱地 Z1>Z4,林地 Z2>Z5,果园 Z3>Z6。



图中字母标注见表1中的采样编号

图1 不同土壤的酚类含量

Figure 1 Phenol contents in different soils

2.2 土壤酚类与土壤性质的关系

土壤酚类与土壤性质的关系如图2所示,可知酚类与全氮、有机质、粉粒具有良好正线性关系,而与砂粒呈负线性关系。相关分析结果显示:土壤酚类含量与铵态氮、全氮、有机质含量都呈显著正相关,而与硝态氮含量无明显相关性;土壤酚类与pH值呈负相关关系,但未达到显著水平;酚类含量和土壤质地也有关系,与粉粒呈显著正相关,与粘粒正相关但未达到显著水平,与砂粒呈显著负相关(表2)。

相关分析结果表明土壤酚类与土壤理化性质之间关系密切,因此进一步对土壤酚类物质含量与土壤各理化性质做逐步回归分析,以明确影响土壤酚类物质含量的主要影响因素,结果如下:

$$\text{回归方程: } y = 83.47x_1 - 0.87x_2 + 46.84$$

其中: y 为土壤酚类含量; x_1 为土壤全氮含量; x_2 为土壤砂粒含量。

结果表明土壤酚类含量与土壤全氮、砂粒含量紧密相关,土壤全氮含量越高,越有利于酚类含量的积累;相反,土壤砂粒越多,酚类含量越少。

图2和表2的结果均表明,土壤有机质含量越高,酚类物质的含量也越高。因酚类物质是土壤有机碳的组成部分,故进一步分析酚类含量占土壤有机质含量的比例(以碳含量计算,表3),结果显示:酚类含量占土壤有机质含量的百分比均不高,平均为0.92%,变化范围为0.57%~1.37%,以采自咸宁旱地X2的土壤酚类占有机质含量比例最低,采自黄冈菜

表2 土壤性质与土壤酚类的相关性分析

Table 2 Correlation coefficients between soil properties and phenol contents

土壤指标	酚类			土壤指标	酚类		
	r	p	n		r	p	n
铵态氮	0.586	0.022	15	pH	-0.507	0.054	15
硝态氮	0.326	0.237	15	粉粒	0.772	0.000 7	15
全氮	0.868	<0.000 1	15	粘粒	0.495	0.061	15
有机质	0.809	0.000 3	15	砂粒	-0.801	0.003	15

表3 不同土壤中酚类含量占有机质含量的比例

Table 3 Percentages of phenol contents to soil organic matter in different soils

采样编号	比例/%	采样编号	比例/%	采样编号	比例/%
H1	1.37	J3	0.70	Z2	1.11
H2	0.71	J4	0.58	Z3	1.26
H3	1.11	X1	0.85	Z4	1.00
J1	0.93	X2	0.57	Z5	0.88
J2	0.83	Z1	1.00	Z6	0.86

地H1的土壤酚类占有机质含量比例最高。

3 讨论

3.1 不同土壤的酚类含量

不同农业土壤的酚类含量存在差异,本研究中其大小顺序是菜地>水田>旱地>林地。这可能与土壤有机质输入量和品质有很密切的关系。菜地是施用农家肥较多的土壤,农家肥所含有机物质丰富,在微生物的降解转化作用下会产生一定量的酚类物质。另外,大部分种植的蔬菜作物根系会分泌酚类物质^[14],这也会使菜地酚类含量较高。水田土壤中酚类含量较高,除了受水稻残体分解产生的酚类较多影响外,还与土壤长期处于淹水状态有关。因为淹水的厌氧环境很大程度上限制了土壤酚氧化酶的活性,降低了酚类物质的降解效率而使其积累^[15]。如Fenner等^[16]指出,长期淹水可抑制酚降解细菌的繁殖,促进湿地土壤酚类物质的积累。Olk等^[17]在稻田研究中也证明酚类物质在种稻淹水的厌氧条件下会得到积累。旱地土壤较菜地和水田土壤的酚类含量低,是由于适度干旱的条件有利于多种土壤酚代谢细菌的生存繁殖^[16],同时增加土壤的酚氧化酶活性^[18],促进酚类物质的降解。林地土壤有机物的主要来源是植物残体和枯枝败叶,有机质输入品质低,故产生或存留的酚类物质也相对较少。

相同农业利用的土壤酚类含量也明显不同。如同为秭归地区且相同农业利用的土壤,酚类含量大小为

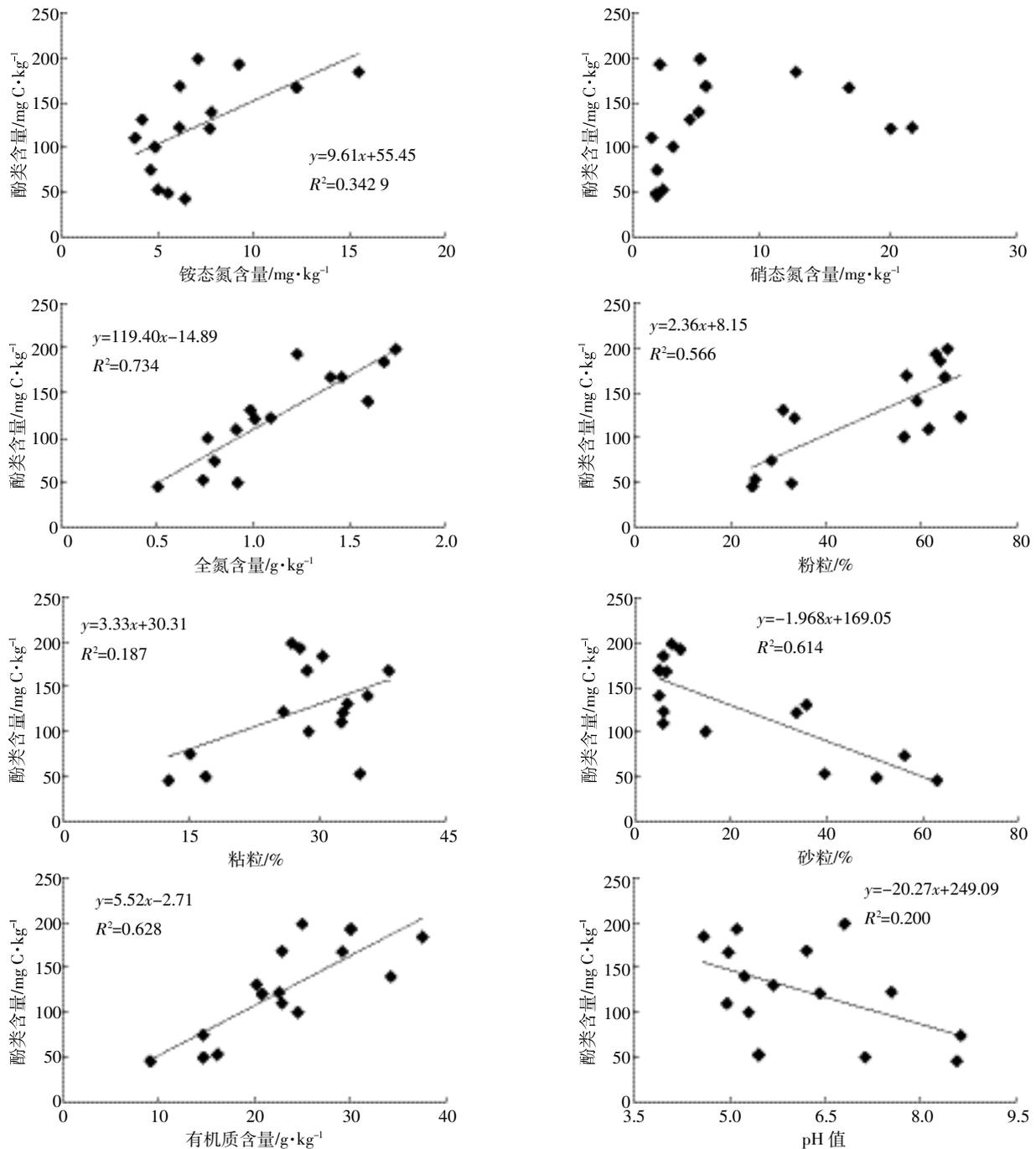


图2 土壤性质与土壤酚类含量的关系

Figure 2 Relationship between soil properties and phenol contents in all soils

Z1>Z4(旱地), Z2>Z5(林地), Z3>Z6(果园),这可能与土壤质地和pH值有关。酚类含量Z1>Z4是因为Z4比Z1的砂粒含量多(表1),这不利于土壤酚类的积累存留,从相关分析结果和逐步回归分析结果可以得到证明。酚类含量Z2>Z5和Z3>Z6,除了与Z5、Z6分别比Z2、Z3砂粒含量多(表1)有关外,还应受到土壤pH值的影响[Z2(pH=5.13)<Z5(pH=8.64),Z3(pH=4.98)<Z6(pH=8.56)]。尽管本研究结果显示土壤酚类和pH

的负相关关系未达到显著水平(图2、表2),但许多已有研究表明土壤酚类物质受pH值影响。首先,由于其本身特殊的结构性能,酚类羟基上的氢容易以H⁺的形式解离,呈弱酸性,故在土壤pH值较高的环境中难以存留。其次,酚氧化酶对土壤pH值的变化极为敏感,且其活性随土壤pH值的升高而增强^[19-20]。可见,较高土壤pH值促进酚氧化酶活性增强,导致酚类物质分解加快,而使积累减少,这正好与本研究

土壤酚类和 pH 值的结果相一致。另外,还有研究表明 pH 值对酚降解细菌的活性也有重要影响,进而影响酚类在土壤中的积累存留^[21]。

3.2 土壤酚类含量与氮含量的关系

土壤酚类物质与铵态氮呈显著的正相关关系,这可能与酚类物质对土壤氮转化过程的影响有关。酚类物质具有抑制土壤硝化作用的功能^[22-23]。随着酚类物质浓度的增加,土壤硝化作用的强度逐渐降低^[24]。一般认为酚类物质对土壤硝化作用的影响,是通过抑制与土壤硝化作用有关的微生物活性来降低土壤硝化作用强度实现的^[25-26]。还有研究表明,酚类物质在厌氧硝化过程中对土壤中氨氧化细菌的活性具有强烈抑制作用^[27]。土壤铵态氮是硝化过程和氨氧化过程的反应底物,酚类物质对这两种氮转化过程的抑制作用,有利于铵态氮在土壤中的持留。

土壤酚类与全氮含量呈极显著正相关关系,除受酚类与铵态氮的正相关关系影响外,主要与土壤酚类和有机氮的作用有关。土壤有机氮是全氮的重要组成部分,其所占比例很大,酚类物质与有机氮的作用将直接影响酚类与土壤全氮的关系。有研究表明酚类物质可共价绑定土壤中的有机氮,降低土壤有机氮的矿化^[28],从而减缓土壤氮素循环^[5, 14, 29]。且酚类物质共价绑定有机氮生成的复合物很稳定,不易被微生物降解或物理化学作用分解^[30],这些都印证了土壤酚类与全氮之间的密切关系。相反,酚类物质与土壤硝态氮含量无显著关系,这可能与硝态氮容易在土壤淋溶过程中流失有关^[31]。逐步回归分析表明土壤全氮对酚类物质的积累有促进作用,这与土壤有机氮和酚类的共价绑定也有着重要关系。可见,酚类物质与土壤氮含量之间的作用是相互的,而不是简单的单向调节作用。

3.3 土壤酚类含量与有机质含量的关系

虽然酚类是土壤有机碳的重要组成部分,但酚类占土壤有机质的比例并不高(表3)。而土壤酚类与有机质含量却呈极显著正相关关系,这表明酚类物质对土壤有机质的周转有着重要调节作用,可见酚类对土壤有机质的影响不容忽视。酚类与土壤有机质之间的关系,可能与酚类物质对土壤有机质分解的抑制作用有关。酚类物质抑制土壤有机质的分解,主要有两个途径:一是抑制土壤微生物活性,二是抑制土壤酶活性。作为一种原生质毒物,酚类物质积累到一定浓度时会对生物产生腐蚀和毒害作用,从而抑制微生物的活性^[32]。此外,酚类物质的积累还会抑制土壤酶活性,如水解酶^[3]和 β -葡萄糖苷酶^[33]等的活性。另有研究表

明,低浓度多酚物质使土壤多酚氧化酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和蛋白酶活性上升,而高浓度却使这些酶的活性下降^[34]。由于土壤微生物和土壤酶在有机质的分解矿化中扮演着重要角色,土壤微生物和土壤酶的活性受到抑制,这将严重阻碍土壤有机质的降解,减少CO₂等温室气体的排放。可见,尽管酚类物质占土壤有机质含量比例较小(表3),但酚类物质在土壤碳氮循环过程中有着重要作用,特别是对于促进土壤碳汇的增强,减少土壤温室气体排放,缓解全球气候变暖具有重要意义。

4 结论

不同农业土壤的酚类含量存在差异,相同农业土壤的酚类含量也不尽相同,这与农业利用方式有关,也受土壤质地和 pH 值的影响。酚类物质与铵态氮含量呈显著正相关,与全氮呈极显著正相关,因为酚类物质可影响土壤的氮转化过程和共价绑定土壤有机氮,甚至影响土壤全氮的积累作用。尽管土壤酚类含量占有有机质含量比例并不高,但酚类物质与有机质呈极显著正相关,且对土壤微生物和土壤酶活性有抑制作用,进而减少土壤有机质的降解。

酚类与土壤碳氮关系在本研究中已有了初步结果,但酚类对土壤碳氮的作用机理尚不清楚。尽管泥炭地的碳汇效应归因于酚类对土壤酶活性的限制作用,但这在其他土壤中不一定适用,不同土壤中酚类对土壤碳的作用机理需具体分析。酚类对土壤的氮循环过程有着重要调节作用,特别是酚类对土壤有机氮的绑定,严重制约了土壤氮素的有效性和作物生长。因此,深入土壤酚类对有机氮绑定作用的机理研究,对土壤肥力的有效利用和减少化学氮肥的施用等农业生产有重要指导意义。

本研究虽得出不同农业土壤的酚类含量基本情况,但土壤样本容量较小,且样本收集局限在湖北地区。因此,为明确不同土壤酚含量的具体情况,需扩大土壤样本容量和拓宽土壤样品采集区域范围。另外,不同种植作物对土壤酚类含量也有影响,如何排除作物对土壤酚含量的干扰依旧是个难题。

参考文献:

- [1] Duiker S W, Lal R. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 52: 73-81.
- [2] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601):

- 2173-2176.
- [3] Hättenschwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(6):238-243.
- [4] Harwood C S, Gibson J. Shedding light on anaerobic benzene ring degradation: A process unique to prokaryotes?[J]. *Journal of Bacteriology*, 1997, 179(2):301-309.
- [5] Freeman C, Ostle N, Kang H. An enzymic "latch" on a global carbon store[J]. *Nature*, 2001, 409: 149.
- [6] 李天杰. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
LI Tian-jie. Soil environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [7] Olk D C, Cassman K G, Rohr K S, et al. Chemical stabilization of soil organic nitrogen by phenolic lignin residues in anaerobic agroecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 3303-3312.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agriculture chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [9] 梁兰英. 紫外分光光度法测定土壤中的硝态氮[J]. 甘肃环境研究与监测, 2001, 14(2):80-81.
LIANG Lan-ying. Ultraviolet spectrophotometry determination of soil nitrate nitrogen[J]. *Gansu Environmental Research and Monitoring*, 2001, 14(2):80-81.
- [10] 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, 2000.
LU Ru-kun. Soil and agriculture chemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [11] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121. 3—2006. 土壤检测, 第3部分: 土壤机械组成的测定[S]. 北京: 农业部, 2006.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 1121. 3—2006. Soil testing, Part 3: Method for determination of soil mechanical composition[S]. Beijing: MOA, 2006.
- [12] Box J D. Investigation of the Folin-Ciocalteu phenol reagent for the determination of polyphenolic substances in natural waters[J]. *Water Research*, 1983, 17: 511-525.
- [13] Bärlocher F, Graca M A S. Total phenolics[M]/Graca M A S, Bärlocher F, Gessner M O. Methods to study litter decomposition: A practical guide. Dordrecht: Springer, 2005: 97-100.
- [14] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 大豆连作及其根茬腐解物对大豆根系分泌物中酚酸类物质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 632-635.
ZHAN Xiu-mei, Han Xiao-ri, Yang Jing-feng, et al. The effect of succession cropping and soybean stubble on soybean root exudates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5): 632-635.
- [15] Fenner N, Freeman C. Drought-induced carbon loss in peatlands[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 895-900.
- [16] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Hydrological effects on the diversity of phenolic degrading bacteria in a peatland: Implications for carbon cycling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1277-1287.
- [17] Olk D C. Phenol accumulation in a young humic fraction following anaerobic decomposition of rice crop residues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 943-951.
- [18] Toberman H, Evans C D, Freeman C, et al. Summer drought effects upon soil and litter extracellular phenol oxidase activity and soluble carbon release in an upland Calluna heathland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1519-1532.
- [19] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11: 1252-1264.
- [20] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 391-404.
- [21] Awan Z R, Shah A H, Amjad M. Microbial degradation of phenol by locally isolated soil bacteria[J]. *Global Advanced Research Journal of Microbiology*, 2013, 2(4): 72-79.
- [22] Kuiters A T. Role of phenolic substances from decomposing forest litter in plant-soil interactions[J]. *Acta Botanica Neerlandica*, 1990, 39: 329-348.
- [23] Schimel J P, Cates R G, Ruess R. The role of balsam poplar secondary chemicals in controlling soil nutrient dynamics through succession in the Alaskan taiga[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 221-234.
- [24] 吴 粤, 刘晓艳, 祝心如. 酚酸类化合物各基团对土壤中氮的硝化作用的影响[J]. 环境化学, 1999, 18(5): 398-403.
WU E, LIU Xiao-yan, ZHU Xin-ru. The effect of groups in phenolic compounds on inhibition of nitrification in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(5): 398-403.
- [25] Rice E L, Pancholy S K. Inhibition of nitrification by climax ecosystems. II. Additional evidence and possible role of tannins [J]. *American Journal of Botany*, 1973, 60: 691-702.
- [26] Baldwin I T, Olson R K, Reiners W A. Protein binding phenolics and the inhibition of nitrification in subalpine balsam fir soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15: 419-423.
- [27] Levén L, Nyberg K, Korkea-aho L, et al. Phenols in anaerobic digestion processes and inhibition of ammonia oxidising bacteria (AOB) in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 364: 229-238.
- [28] Olk D C, Cassman K G, Schmidt-Rohr K, et al. Chemical stabilization of soil organic nitrogen by phenolic lignin residues in anaerobic agroecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 3303-3312.
- [29] Olk D C, Samson M I, Gapas P. Inhibition of nitrogen mineralization in young humic fractions by anaerobic decomposition of rice crop residues [J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58: 270-281.
- [30] Kraus T E C, Yu Z, Preston C M, et al. Linking chemical reactivity and protein precipitation to structural characteristics of foliar tannins[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2003, 29: 703-730.
- [31] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗的特点[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 16-18.
WANG De-jian, LIN Jing-hui, XIA Li-zhong. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 16-18.
- [32] Bragazza L, Freeman C. High nitrogen availability reduces polyphenol content in Sphagnum peat[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 307: 439-443.
- [33] Tian L, Dell E, Shi W. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: Correlations with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46: 426-435.
- [34] 马云华, 王秀峰, 魏 珉, 等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2149-2153.
MA Yun-hua, WANG Xiu-feng, WEI Min, et al. Accumulation of phenolic acids in continuously cropped cucumber soil and their effects on soil microbes and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2149-2153.