

贾昌梅,牛显春,张冬梅,等. 广州市农田生态系统土壤养分和微生物量的分布特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):446-451.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.07.129

广州市农田生态系统土壤养分和微生物量的分布特征

贾昌梅,牛显春,张冬梅,陈梅芹

(广东石油化工学院环境与生物工程学院,广东茂名 525000)

摘要:通过野外调查与室内分析,研究广州市农田生态系统土壤养分和微生物量及其垂直分布特征。结果表明,广州市土壤有机碳含量、全氮含量、全钾含量基本呈现出一致性规律,依次表现为花都区>黄浦区、白云区>天河区,全磷含量在4个地区没有显著差异;通过变异系数分析可知,广州市微生物量具有高度的空间变异性,而土壤全磷含量的变异系数最低,由此可知土壤微生物量是可以表征土壤肥力的敏感因子;线性回归分析可知,广州市土壤养分之间均具有良好的线性正相关性($P<0.01$);广州市土壤微生物量碳、微生物量氮基本呈现出一致性规律,依次表现为花都区>黄浦区、白云区>天河区;土壤微生物活度的变化范围在0.41~0.69,依次表现为花都区>黄浦区>白云区>天河区;广州市土壤微生物量碳周转率高于氮周转率,说明微生物量碳更新比微生物量氮快;广州市土壤养分含量、微生物量随土层深度的增加呈下降趋势,表现出上肥下瘦的特点,均以0~10 cm土层(表层)最高,呈现出明显的“表聚性”,20~30 cm土层基本相等,也即广州市农田生态系统土壤养分和微生物量差异表现在土壤表层,在深层并没有明显的差异。相关性分析可知,广州市土壤有机碳与全氮呈极显著线性正相关($P<0.01$),土壤养分和土壤微生物量均呈现出一定的相关性。

关键词:广州市;农田生态系统;土壤养分;土壤微生物量;分布特征

中图分类号: S154.3;S606⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)07-0446-06

土壤是生态系统中的重要组成部分,土壤养分在有机物质分解转化过程中起主导作用,影响着土壤生态系统中的能量流动、物质循环,能够反映土壤质量、健康状况^[1-3];土壤微生物量能反映参与调控土壤中能量、养分循环以及有机物质转化情况,被认为是土壤活性养分的储库,也是植物生长可利

用养分的重要来源,在评价土壤肥力、环境监测、土地利用等方面有广泛的作用^[4-5];土壤养分和微生物量是构成农田生态系统中农作物高产稳产的物质基础,对农作物生长、发育及其产量有着直接影响^[6-7];与此同时,土壤养分、微生物量具有较大的时空尺度变化,受气候、成土母质、成土条件、地区、栽培历史等影响,导致土壤肥力差异较大,进而影响土壤养分、微生物量的分布、迁移^[4,8]。

农田生态系统是在自然基础上经人工控制形成的农业生态系统中的亚生态系统,是地球上最重要的生态系统之一,提供着全世界66%的粮食供给^[9-10]。农田生态系统具有高度的目的性、开放性、高效性、易变性、脆弱性、依赖性等特点,在提供功能、支持功能、调节功能以及文化功能方面起着独有的

收稿日期:2016-01-02

基金项目:广东省科技计划(编号:2012B031000024,2012B010500028);广东省本科高校教育改革建设项目(编号:650260,286);广东省本科高校质量工程建设项目(编号:650244);广东省高等教育教学改革综合类项目(编号:GDJG20141219)。

作者简介:贾昌梅(1963—),女,江西南昌人,教授,工程师,研究方向为环境污染和环境工程。E-mail:JIA_Changmei@163.com。

一方面,国家应从总体上纠正漫灌式、污染式的农业用水方式,建立起节水灌溉、生态灌溉的农业用水方式。着力从政策设计、技术推广、制度优化等层面推进集约式农业生态用水方式。另一方面,各省份结合本省的实际,着重解决农业生态用水中的短板,通过区域结构优化、投入产出结构优化改善其农业生态用水效率。

参考文献:

- [1]刘渝,王发. 农业水资源利用效率分析——全要素水资源调整目标比率的应用[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2012(6):26-30.
- [2]张雄化,钟若愚. 灌溉水资源效率、空间溢出与影响因素[J]. 华南农业大学学报:社会科学版,2015(4):20-28.
- [3]赵凯,孙天合. 滴灌技术下的农业用水配置效率评价研究——基于杨凌示范区温室大棚的数据[J]. 节水灌溉,2014(12):71-

75.

- [4]杨 骞,刘华军. 污染排放约束下中国农业水资源效率的区域差异与影响因素[J]. 数量经济技术经济研究,2015(1):114-128.
- [5]李 静,马潇琛. 资源与环境约束下的产粮区粮食生产用水效率与影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2015(2):252-258.
- [6]侯 翔,马占新,赵春英. 数据包络分析模型评述与分类[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2010,41(5):583-593.
- [7]Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: a slack-based measure(SBM) approach[R]. GRIPS Research Report Series, 2003,1-2003-0005.
- [8]杨清可,段学军,叶 磊,等. 基于SBM-Undesirable模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区16城市为例[J]. 资源科学,2014,36(4):712-721.
- [9]Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management Science,1993,39(10):1261-1265.

作用^[11-12]。广州市地处华南地区,是我国重要的农业生产基地,丰富的水热资源为农业生产提供了良好的自然条件^[13-14],而近年来,广州市农田生态系统土壤质量逐步退化,对该地区农业可持续发展产生了严重影响,而关于该区土壤养分、微生物生物量的变化研究还鲜见报道。因此,笔者所在课题组对广州市农田生态系统土壤养分、微生物量及垂直分布开展系统研究,以期有效地指导农业生产可持续发展提供科学依据,进而为该地区农业土地合理利用提供重要的决策依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

广州市(109°39'~117°19'E,20°13'~25°31'N)位于广东省中南部、珠江三角洲北缘,接近珠江流域下游入海口,是华南地区的中心城市,地势呈北高南低,东、北部是山区,中部是丘陵、台地,南部是珠江三角洲平原。该区属南亚热带海洋性季风气候,具有高温多雨、干湿季节明显的气候特点,年平均气温 21~22℃,最冷月均温 13~14℃,最热月均温 28~29℃,≥10℃积温 6 000~8 000℃;年平均降水量 1 600~2 000 mm,降水主要集中在 4—9 月,占全年的 80%以上,10 月至翌年 3 月为旱季,湿热同期,雨量充沛;日照充足,年日照时间在 1 800 h 以上;地带性土壤主要有红壤、赤红壤、砖红壤。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 根据广州市土壤类型的分布特征,分别在天河区、白云区、花都区和黄浦区选定农田生态系统,农田均为水旱轮作旱田。取样时间为 2015 年 7 月,在每个采样区内设置 3 个重复样地,在每个样地用小钢铲采集 5 点法取 0~10、10~20、20~30 cm 土样,混合均匀后,用 4 分法取适量土样,采样时除去土壤表面的动植物残体,将所采土壤样品充分混匀后用聚乙烯无菌塑料袋密封包好,并迅速带回实验室内进行分析测定。所取土样分为 2 份:1 份新鲜土样过 2 mm 筛后测定土壤微生物量、微生物活性;1 份自然风干(20 d)后去除碎片、部分根后过 0.5 mm 筛,测定土壤养分含量。

1.2.2 样品测定 土壤养分含量的测定:土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定;土壤全磷(TP)含量用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;土壤全氮(TN)含量用全自动凯氏定氮法测定;全钾(TK)含量采用火焰分光光度法测定;土壤微生物量碳(SMB-C)、微生物量氮(SMB-N)含量采用三氯甲烷熏蒸-K₂SO₄浸提法^[15]测定。

土壤微生物的周转按照高云超等的方法进行估算^[16],相应公式为:

$$\beta = \sum A/N。$$

式中: β 为微生物量库容值,mg/kg; A 为微生物量总和,mg/kg; N 为采样数,次。

$$r_b = \sum B/\beta。$$

式中: r_b 为微生物量周转率(年⁻¹); B 为微生物量转移量,mg/kg。

$$T = 1/r_b。$$

式中: T 为微生物量周转周期,年。

$$F = \beta \times \rho \times h/T。$$

式中: F 为微生物量流通量,kg/(hm²·年); ρ 为采样土壤密度,kg/m³; h 为采样深度,m。

土壤微生物活度的测定:采用改进的 FDA 法^[15]。

统计分析:利用 Excel 2007、SPSS 18.00 软件对数据进行分析;采用 Origin 9.2 作图;进行单因素方差分析(one-way ANOVA);显著性分析采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 广州市农田生态系统土壤养分分布特征

2.1.1 广州市农田生态系统土壤养分分布特征 由图 1 可知,广州市土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量基本呈现出一致性规律,其中土壤有机碳含量的变化范围为 10.85~18.52 g/kg,依次表现为花都区>黄浦区>白云区>天河区,花都区显著高于其他地区($P<0.05$),天河区显著低于其他地区($P<0.05$),而白云区、黄浦区差异不显著;土壤全氮含量的变化范围为 1.15~1.98 g/kg,依次表现为花都区>白云区>黄浦区>天河区,花都区、白云区显著高于天河区、黄浦区($P<0.05$),花都区、白云区差异不显著,天河区、黄浦区差异不显著;土壤全磷含量的变化范围为 1.07~1.26 g/kg,依次表现为白云区>天河区>花都区>黄浦区,4 个地区土壤全磷含量均不显著;土壤全钾含量的变化范围为 18.56~25.49 g/kg,依次表现为花都区>黄浦区>白云区>天河区,花都区、黄浦区显著高于天河区、白云区($P<0.05$),花都区、黄浦区差异不显著,天河区、白云区差异不显著;土壤全磷含量的变异系数最低。

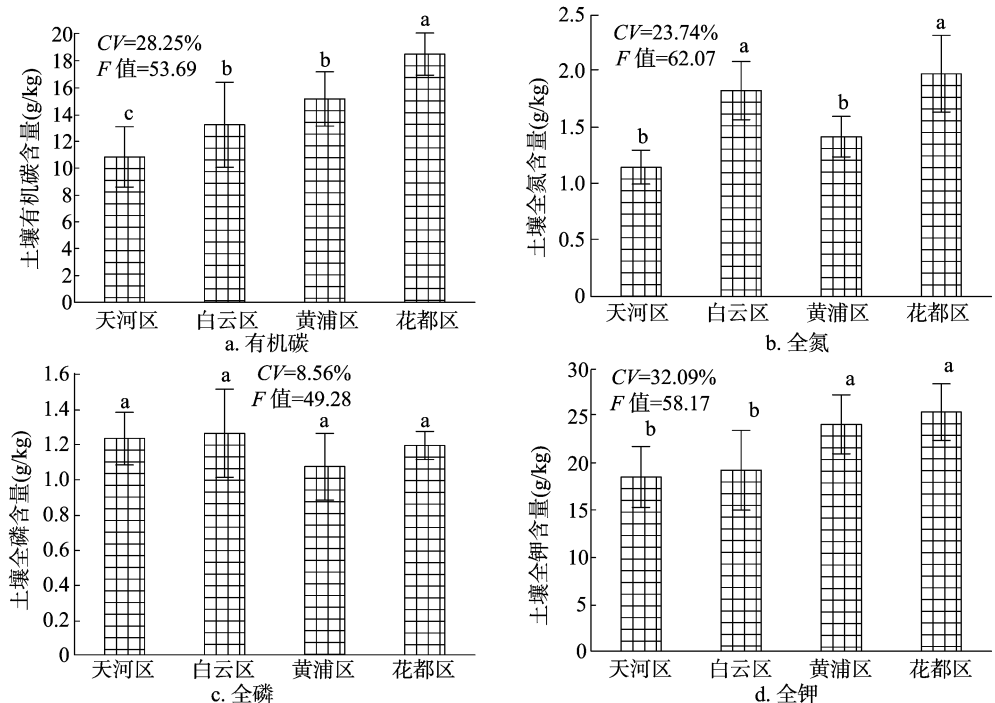
2.1.2 广州市农田生态系统土壤养分的垂直分布特征 图 2 从土壤剖面反映了广州市土壤养分的垂直分布规律,可以看出:土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量随土层深度的增加呈下降趋势,表现出上肥下瘦的特点;土壤养分含量均以 0~10 cm 土层(表层)最高,呈现出明显的“表聚性”;20~30 cm 土层内土壤养分含量最低;10 cm 土层以下土壤养分含量急剧下降,相同土层内土壤全量养分含量基本表现为花都区>黄浦区、白云区>天河区的规律,局部有所波动。广州市土壤养分含量在 20~30 cm 土层基本相等,也即广州市农田生态系统土壤养分差异表现在土壤表层,深层土壤养分含量并没有明显的差异。

2.2 广州市农田生态系统土壤养分线性相关性

通过 SPSS 分析,将广州市土壤养分数据进行线性拟合,经统计学检验得到拟合度 R^2 、校正 R^2 、显著值(P 值)、 F 值,并在 0.05、0.01 水平检验显著性。结果表明,线性回归均达到极显著相关($P<0.01$),各线性回归关系成立。由表 1 可知,广州市土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量之间均存在极显著正线性相关关系($P<0.01$),表明广州市土壤养分之间均具有良好的线性正相关性($P<0.01$)。

2.3 广州市农田生态系统土壤微生物量的分布特征

2.3.1 广州市农田生态系统土壤微生物量分布特征 从图 3 可以看出,广州市土壤微生物量碳含量的变化范围为 423.6~658.9 mg/kg,依次表现为花都区>白云区>黄浦区>天河区,4 个地区土壤微生物量碳含量差异均显著($P<0.05$);土壤微生物量氮含量的变化范围为 35.9~62.5 g/kg,依次表现为花都区>黄浦区>白云区>天河区,天河区、白云



不同处理间的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) ; CV 表示变异系数。图3、图5、图6、图7同
图1 广州市农田生态系统土壤养分分布特征

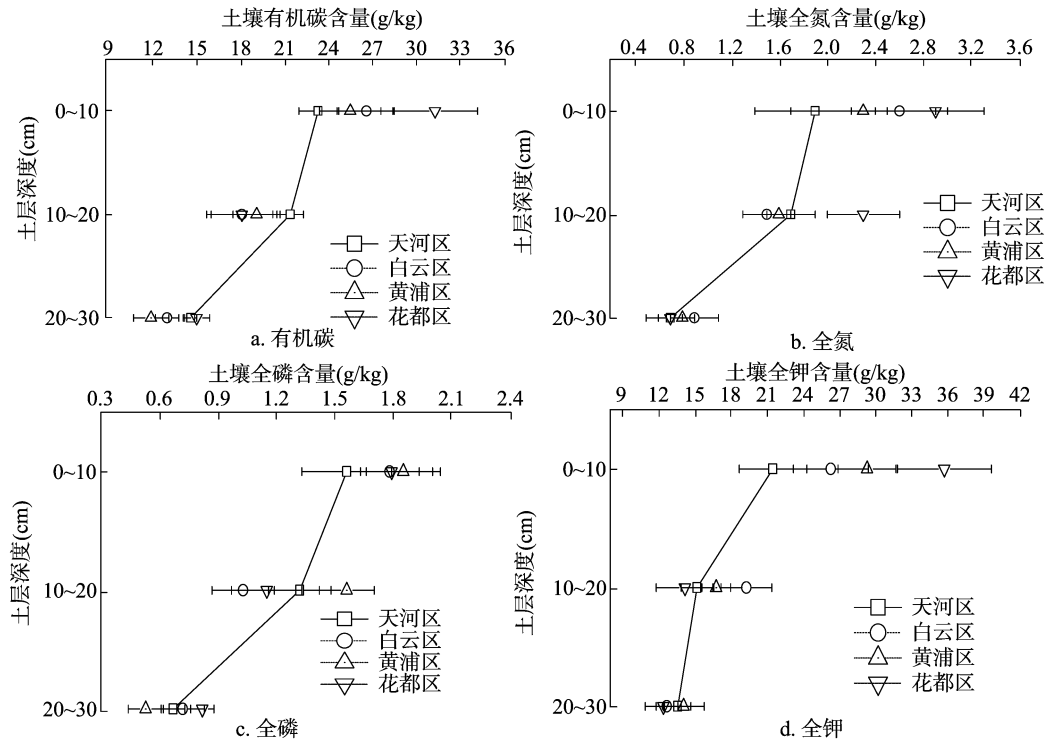


图2 广州市农田生态系统土壤养分垂直分布特征

区差异不显著,显著低于花都区、黄浦区 ($P<0.05$);SMB - C/SOC 的变化范围为 3.45% ~ 4.63%,依次表现为白云区 > 天河区 > 花都区 > 黄浦区,白云区显著高于其他地区,天河区、黄浦区、花都区差异不显著,土壤微生物量碳、氮的变异系数均较土壤养分的变异系数大。

2.3.2 广州市农田生态系统土壤微生物量的垂直分布特征

从土壤剖面上看,图 4 反映了广州市土壤微生物量的垂直分布规律,可以看出:土壤微生物量碳、氮含量随土层深度的增加呈下降趋势,表现出上肥下瘦的特点;土壤微生物量碳、氮含量均以 0 ~ 10 cm 土层(表层)最高,呈现出明显的“表聚性”;20 ~ 30 cm 土层内土壤微生物量碳、氮含量最低;10 cm 土层以下急剧下降,相同土层内土壤微生物量碳、氮含量基本

表 1 广州市农田生态系统土壤养分线性相关性

<i>x</i>	<i>y</i>	<i>R</i> ²	校正 <i>R</i> ²	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
有机碳含量	全氮含量	0.923 5	0.904 1	76.36	0.001 **
有机碳含量	全磷含量	0.915 8	0.893 6	81.25	0.000 **
有机碳含量	全钾含量	0.895 2	0.823 4	68.23	0.005 **
全氮含量	全磷含量	0.869 1	0.812 9	73.14	0.000 **
全氮含量	全钾含量	0.723 5	0.696 8	79.02	0.001 **
全磷含量	全钾含量	0.812 5	0.784 6	65.38	0.006 **

注：“*”“**”分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

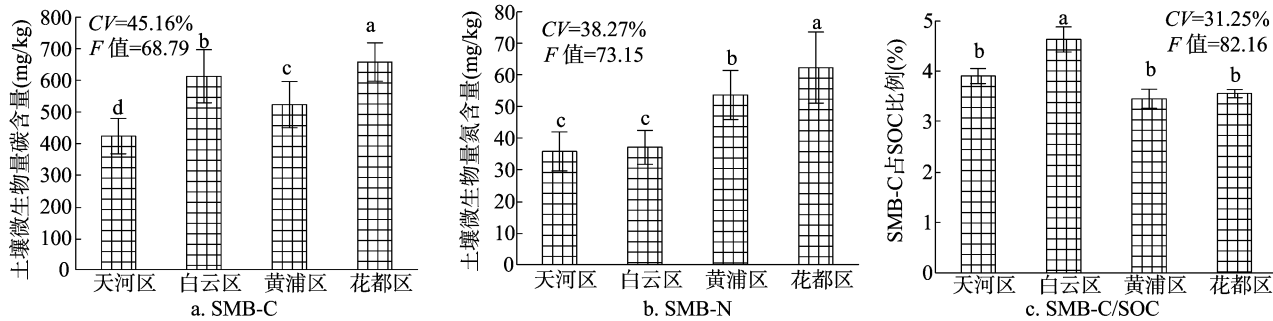


图 3 广州市农田生态系统土壤微生物量分布特征

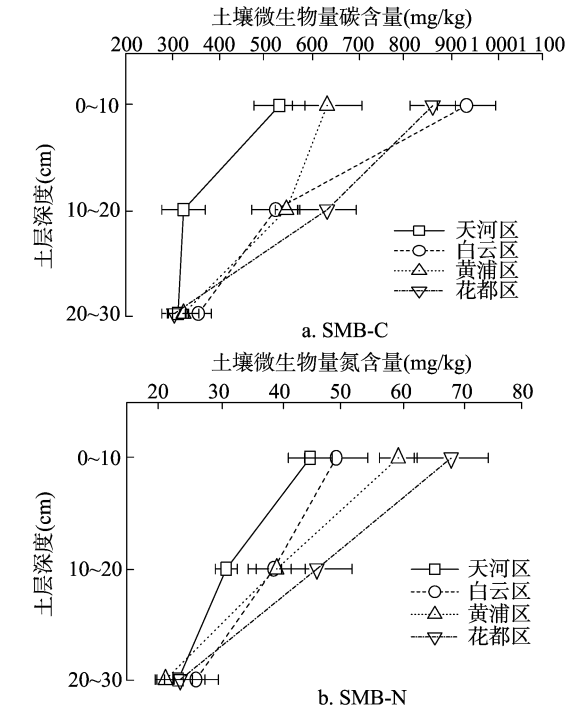


图 4 广州市农田生态系统土壤微生物量的垂直分布特征

微生物量碳为 1.13 年更新 1 次。由图 6 可知,天河区微生物量氮周转率为 0.69 年⁻¹,周转周期为 2.56 年,天河区土壤微生物量氮为 2.56 年更新 1 次。广州市土壤微生物量碳周转率高于氮周转率,说明微生物量碳更新比微生物量氮快。

广州市土壤微生物量碳、氮周转基本呈现出一致性规律,其中土壤微生物量碳转移量大小表现为花都区 > 黄浦区 > 白云区 > 天河区,4 个地区差异均显著 ($P < 0.05$);土微生物量碳周转率大小为黄浦区 > 花都区 > 白云区 > 天河区,黄浦区、花都区差异并不显著;土壤微生物量碳周转期排序为天河

表现为花都区 > 黄浦区、白云区 > 天河区的规律,局部有所波动。广州市土壤微生物量碳、氮含量在 20 ~ 30 cm 土层基本相等,也即广州市农田生态系统土壤微生物量碳、氮含量差异表现在土壤表层,在深层并没有明显的差异。

2.4 广州市农田生态系统土壤的微生物周转

土壤微生物周转对土壤有机质、养分循环起着决定作用,对了解土壤养分供应潜力、植物养分的有效性有非常重要的意义。由图 5 可知,天河区土壤微生物周转率最低,微生物量碳周转率为 0.69 年⁻¹,周转周期为 1.13 年,说明天河区土壤

区 > 白云区 > 黄浦区 > 花都区;土壤微生物量碳流通量大小为黄浦区 > 花都区 > 白云区 > 天河区,4 个地区差异均显著 ($P < 0.05$)。土壤微生物量氮转移量大小为花都区 > 黄浦区 > 白云区 > 天河区,花都区、黄浦区差异不显著,显著高于其他地区 ($P < 0.05$);土壤微生物量氮周转率大小为花都区 > 黄浦区 > 白云区 > 天河区,天河区、白云区差异并不显著;土壤微生物量氮周转期排序为天河区 > 白云区 > 黄浦区 > 花都区,白云区、黄浦区、花都区差异并不显著,显著低于天河区 ($P < 0.05$);土壤微生物量氮流通量大小为黄浦区 > 花都区 > 白云区 > 天河区,黄浦区、花都区差异并不显著。

2.5 广州市农田生态系统土壤微生物活性

由图 7 可见,单因素方差分析结果表明,广州市土壤微生物活度的变化范围为 0.41 ~ 0.69,表现为花都区 > 黄浦区 > 白云区 > 天河区,黄浦区、花都区差异不显著,白云区、黄浦区差异不显著,天河区显著低于其他地区 ($P < 0.05$)。主要是由于天河区土壤肥力较低,导致活动区土壤微生物数量、酶活性降低,从而造成土壤微生物活性显著较低。

2.6 广州市农田生态系统土壤养分与土壤微生物量相关分析

由表 2 可知,土壤有机碳含量与全氮含量、全钾含量、微生物量碳含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与全磷含量、微生物量氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$);土壤全氮含量与微生物量氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与全磷含量、全钾含量、微生物量碳含量呈显著正相关 ($P < 0.05$);土壤全磷含量与微生物量氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$);土壤微生物量碳含量与微生物量氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论与结论

土壤养分不仅能反映土壤“营养库”中养分的贮量水平,而且能在一定程度上影响有效养分的供应能力^[1-3]。本研究

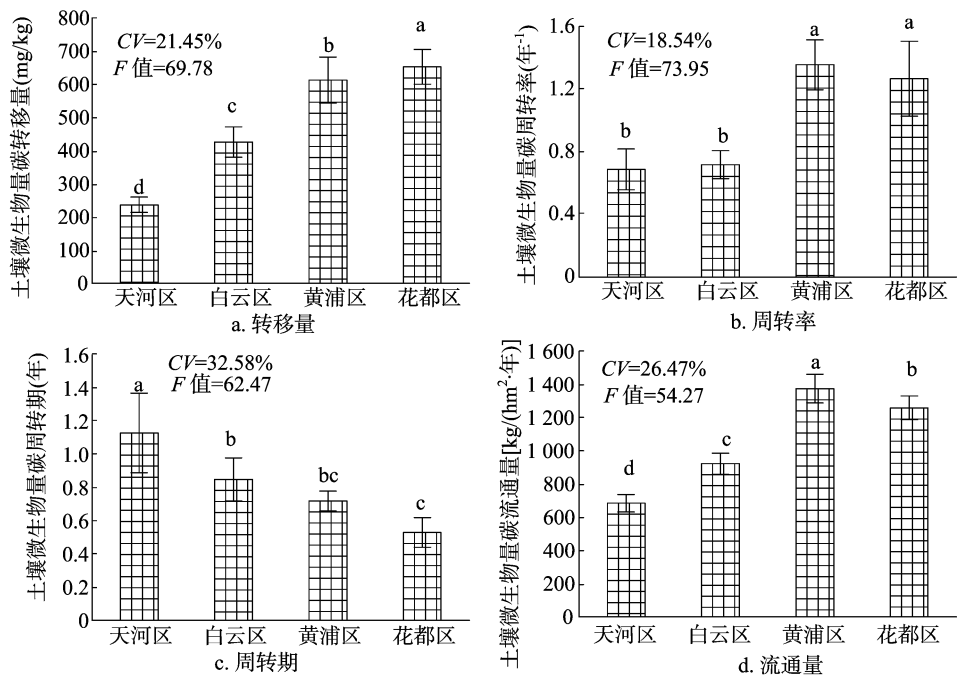


图5 广州市农田生态系统土壤微生物量的碳周转

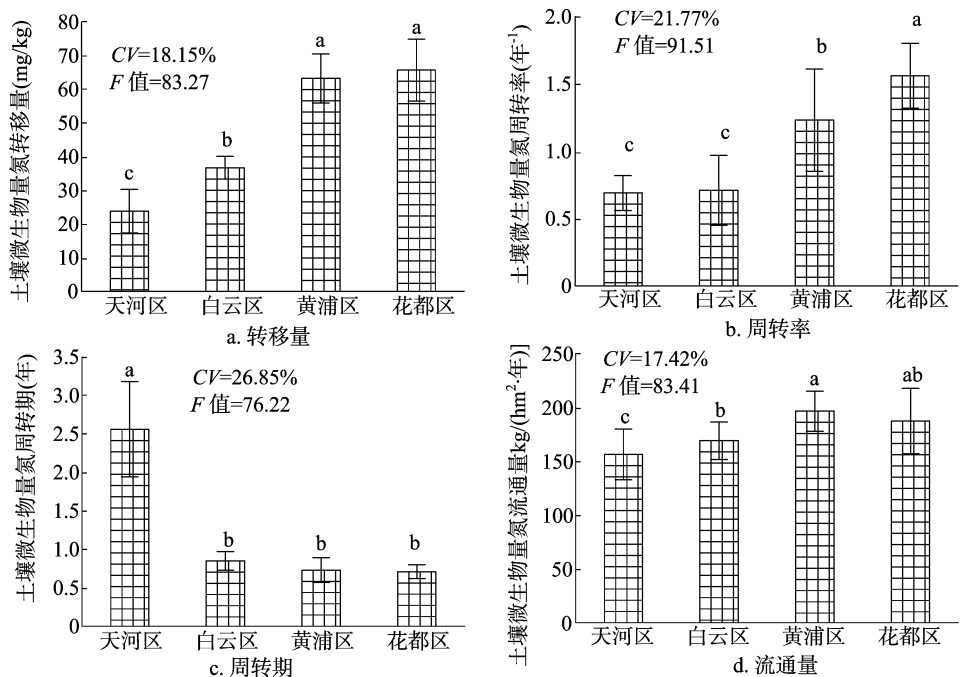


图6 广州市农田生态系统土壤微生物量的氮周转

中土壤系统内部因子处于动态变化和平衡中,通过变异系数分析可知,广州市土壤微生物量具有高度的空间变异性,而土壤全磷含量的变异系数最小,即在相同的区域,其含量存在明显差异,而土壤微生物量的变异程度高于土壤养分,由此可知土壤微生物量是可以表征土壤肥力的敏感因子;土壤微生物量库的微小变化都会影响养分的循环和有效性,而结构良好、有机碳和水分含量较高的土壤能为土壤微生物活动提供优良的生境,有利于土壤微生物的生长^[4-5]。农田生态系统主要是由于人为的大量施肥,造成水溶性养分含量增加,进而导致

土壤微生物量的变异性较大,加上农田作物具有致密的浅层根系,能够更好地富集土壤微生物量;而土壤全磷含量在不同区域差异并不显著,主要是由于磷作为一种沉积性元素,其分解作用缓慢,因此其变化范围和空间变异性较低^[17-18]。从土壤养分、微生物量的垂直分布特征来看,土壤养分、微生物量随土层深度的增加呈下降趋势,表现出上肥下瘦的特点,均以0~10 cm 土层(表层)最高,呈现出明显的“表聚性”,20~30 cm 土层土壤养分和微生物量最低,10 cm 土层以下急剧下降,相同土层内土壤养分和微生物量基本表现为花

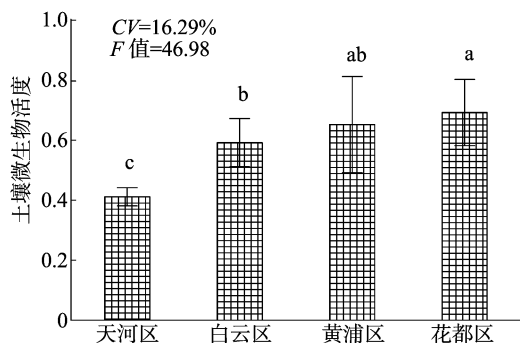


图7 广州市农田生态系统土壤微生物活性

表2 广州市农田生态系统土壤养分与土壤微生物量相关分析

指标	有机碳含量	全氮含量	全磷含量	全钾含量	微生物量碳含量	微生物量氮含量
有机碳含量	1.000					
全氮含量	0.956 **	1.000				
全磷含量	0.714 *	0.623 *	1.000			
全钾含量	0.825 **	0.520 *	0.356	1.000		
微生物量碳含量	0.913 **	0.517 *	0.217	0.457	1.000	
微生物量氮含量	0.568 *	0.913 **	0.538 *	0.239	0.903 **	1.000

注：“**”表示相关性在 0.01 水平上极显著（双尾），“*”表示相关性在 0.05 水平上显著（双尾）。

都区 > 黄浦区、白云区 > 天河区规律，局部有所波动。广州市土壤养分、微生物量在 20 ~ 30cm 土层基本相等，即广州市农田生态系统土壤养分、微生物量差异表现在土壤表层，在深层并没有明显的差异。在农业生产中，可以根据土壤养分、微生物量在土壤剖面的垂直分布特征，选择适当的浅根系或深根系农作物进行种植，以充分利用土壤中养分。

大量研究表明，土壤有机碳与全氮呈显著正相关^[19-21]。本研究结果表明，广州市土壤有机碳含量与全氮含量呈极显著线性正相关性（ $P < 0.01$ ），土壤养分和土壤微生物量均呈现出一定的相关性，表明土壤有机质作为碳源和其他营养成分的来源，有利于微生物及酶活性的提高。土壤微生物活动和代谢进而影响土壤养分含量，它们可以看作相互作用和影响的地下有机整体，体现了地下生态系统各指标之间的统一性，也进一步证实土壤微生物量碳氮是可以作为表征土壤肥力的敏感因子，这与前人的研究结果^[19-21]相一致。因此，要提高广州市农田生态系统土壤肥力，则应该从提高土壤有机质含量、调节有机质的积累与分解入手。此外，由广州市农田生态系统土壤养分和微生物量分布规律和特征可知，我们可以从中借鉴经验，促进土地资源的管理及合理有效利用，在今后的土地利用中，大力推进秸秆还田、作物留茬，保证土壤养分的有效积累，促进农田土壤养分的恢复和利用。

参考文献：

[1] Gómez-Sagasti M T, Alkorta I, Becerril J M, et al. Microbial monitoring of the recovery of soil quality during heavy metal phytoremediation[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(6): 3249 - 3262.

[2] Bone J, Barraclough D, Eggleton P, et al. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data[J]. Land Degradation & Development, 2014, 25(3): 251 - 266.

[3] Chaparro J M, Shefflin A M, Manter D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 489 - 499.

[4] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with *Eucalyptus* biochar addition to a coarse textured soil[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 311 - 324.

[5] Liu L, Gundersen P, Zhang T, et al. Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 44(1): 31 - 38.

[6] Turner B L, Lambers H, Condron L M, et al. Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development[J]. Plant and Soil, 2013, 367(1/2): 225 - 234.

[7] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2013, 22(6): 737 - 749.

[8] Edwards K A, Jefferies R L. Inter-annual and seasonal dynamics of soil microbial biomass and nutrients in wet and dry low-Arctic sedge meadows[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57(3): 83 - 90.

[9] Han Z Y, Meng Y L, Xu J, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem—taking Jiangsu Province as a case[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5): 1034 - 1041.

[10] Wratten S D, Gillespie M, Decourtaye A, et al. Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 159(18): 112 - 122.

[11] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳排放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035 - 2039.

[12] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35 - 38.

[13] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 645 - 651.

[14] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 98 - 100.

[15] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 生态学杂志, 1999, 18(2): 63 - 66.

[16] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 土壤微生物生物量周转的估算[J]. 生态学杂志, 1993, 12(6): 6 - 10.

[17] 杨珏, 阮晓红. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. 土壤与环境, 2007, 10(3): 256 - 258.

[18] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 等. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 366 - 370.

[19] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 384 - 389.

[20] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤有机碳和全氮含量变化[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 976 - 982.

[21] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57 - 60.