

不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究

沈 宏, 曹志洪

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 讨论不同农田生态系统的土壤活性碳库和碳库管理指数(CPMI), 结果表明: 不同农田生态系统的土壤 CPMI 明显受施肥、气候、土壤利用方式、耕种年限等因素的影响。供试土壤的活性碳含量范围为 0.49 ~ 4.99mg/g, 土壤 CPMI 为 51.6 ~ 165。不同施肥处理对红壤 CPMI 的影响顺序为绿肥(GM) > 厩肥(FYM) > FYM + NPK > 参考(REF) > NPK > 对照(CK); 在水稻土中, 其相应的影响顺序为 稻草(RSC) > FYM > FYM + NPK > PEF > NPK > CK。黄棕壤中, 与 PEF 的 CPMI 值相比, GM、FYM 和 FYM + NPK 3 个处理分别提高了 50%、45.9% 和 21.9%, NPK 和 CK 处理分别下降了 6% 和 38.1%。潮土中, 施肥 10a 的 CPMI 值与施肥 5a 的值相比较, FYM 和 FYM + NPK 处理提高了 28.4% 和 19.7%, 而 NPK 和 CK 处理分别下降 8.7% 和 17.9%。相关分析表明: CPMI 与土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 的相关性高于 CPI、A、Al。CPMI 可灵敏地反映农业生产措施对土壤肥力、土壤碳库动态变化的影响。

关键词 活性碳 碳库管理指数(CPMI) 施肥 农田土壤

Study on soil C pool management index of different farmland ecosystems

SHEN Hong, CAO Zhi-Hong (Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008, China)

Abstract The active C pool and CPMI (C pool management index) of soils in different agricultural ecosystems were discussed. The results indicated that CPMI was significantly affected by fertilization, climate, soil utilization patterns and cultivated age.

The active C measured by KMnO_4 oxidation of soils varied from 0.49 to 4.99mg/g, CPMI from 51.6 to 165. The CPMI order of red soil in tropics influenced by different fertilization was GM (green manure) > FYM (farmyard manure) > FYM + NPK > PEF (reference) > NPK > CK. In subtropical zone, the corresponding order was RSC (rice straw compost) > FYM > FYM + NPK > REF > CK in paddy soil. In yellow-brown soil, the CPMI of GM, FYM, FYM + NPK increased by 50%, 45.9% and 21.9%, compared with reference, while that of NPK and CK decreased by 6% and 38.1%, respectively. In meadow soil of temperate zone, CPMI for 10-year FYM application increased by 28.4%, for FYM + NPK by 19.7%, while for NPK and CK decreased by 8.7% and 17.8%, respectively, in comparison with CPMI influenced by 5-year fertilization. It was found that CPMI was significantly correlated with total N, total P, hydrolyzable N, readily available P, K and pH. It is concluded that CPMI is a sensitive and practical index to reflect the impacts of agricultural measures on soil fertility and the dynamics of C pool variation.

Key words active C, C pool management index (CPMI), fertilization, agricultural soils

文章编号: 1000-093X(2000)02-0177-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

土壤碳库的动态平衡与作物营养、土壤管理关系密切, 直接影响到作物产量^[1,2]。同时, 土壤碳库容量也是土壤质量的一个重要指标。由于自然土壤的高背景值和土壤类型的多样性, 土壤全碳的微小变化难以

基金项目 国家自然科学基金资助项目

本研究承蒙澳大利亚 Graeme J. Blair 教授协助测定 C_r , 特此致谢

收稿日期: 1998-01-21, 修订日期: 1999-03-27

作者简介

沈宏 (1970 ~), 男, 湖北洪湖人, 博士, 副教授。主要从事植物营养与施肥, 农业生态环境方面的研究。

观测到^[3]。因此,一些学者们试图用土壤有机碳亚库来指示全碳变化^[3,4]。实际上,农业生产措施(如土壤耕作管理、化肥的施用、植物残体或有机物料的还田等)引起土壤碳库的最初变化主要是易分解、矿化,即活性碳部分。尽管这部分碳素占全碳的比例很小,但它们对土壤碳素的转化很重要,而且与土壤生产力密切相关^[3,5]。所以,Dalal^[5]等人认为用不稳态碳(Labile C)指示土壤碳库变化比较好。Loginow 和 Blair 等人^[6]认为用中等强度的化学氧化剂氧化有机碳,来模拟微生物对有机碳的降解,克服了测定微生物量需要做培养试验而且极易受环境因子影响的缺点,该方法方便、简单,但需要昂贵仪器测定土壤全碳。有人认为,微生物量大小是了解土壤碳素转化的关键^[7,8],但微生物量易受土壤湿度、温度、微生物种类等因素的影响,用其指示土壤碳素变化不适合^[9~11]。本研究运用高锰酸钾氧化法和碳、氮自动分析-质谱联用仪测定了不同农田生态系统中土壤活性碳、全碳含量,并计算出了土壤碳库管理指数。

此外,还分析了施肥、气候、土壤利用方式及耕种年限等因素对土壤碳库管理指数的影响,旨在探讨土壤碳库管理指数对土壤碳库动态监测的有效性,以进一步提高土壤肥力及土壤质量的监控和管理水平。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、肥料

供试潮土采自河南新乡(分别耕种 5a、10a)处暖温带,水稻土采自苏州(耕种 8a)黄棕壤采自南京郊区(耕种 8a)处地亚热带,红壤采自广州郊区(耕种 8a)处南亚热带,均为 0~15cm 的耕层土壤。

农田土壤一般受环境等因子影响较大,因此在试验中,选取与试验地土壤类型相同、位置相近、受人类扰动较小的林地、墓地、未垦地或原始森林土壤作为参照土壤(REF)。

供试氮肥为尿素(N)455g/kg,磷肥为过磷酸钙(P₂O₅)160g/kg 和钙镁磷肥(P₂O₅)165g/kg;厩肥(FYM),主要由猪粪与植物残体制成,含有机碳 353g/kg,全氮 16.5g/kg,绿肥(GM),主要是萝卜菜,含有机碳 428g/kg,全氮 24.1g/kg,稻草(RSC)含有机碳 386g/kg,全氮 19.4g/kg。

1.2 试验处理及轮作方式

试验处理:红壤:REF、CK、GM、FYM、FYM+NPK、NPK 6 种处理;水稻土:REF、CK、RSC、FYM、FYM+NPK、NPK 6 种处理;黄棕壤:REF、CK、GM、FYM、FYM+NPK、NPK 6 种处理;潮土:REF、CK1、CK2、FYM1、FYM2、FYM+NPK1、FYM+NPK2、NPK1、NPK2 9 种处理。每个处理重复 3 次。其中 FYM 年施用量为 15000kg/hm²,RSC、GM 为 3000kg/hm²(干重),NPK 为 N300kg/hm²,P₂O₅ 为 150kg/hm²,K₂O 为 150kg/hm²。FYM+NPK 处理施肥量为 FYM 处理、NPK 处理前述施肥量的 1/2。CK 为不施肥处理。每季作物肥料施用量为总施肥量的 1/2。轮作方式:潮土为小麦-玉米轮作,水稻土为稻-麦轮作,黄棕壤为玉米-油菜轮作,红壤为花生-小麦轮作。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤活性碳、全碳 称取 2g 风干土壤样品(含 C 15~30mg),于 100ml 塑料瓶内,加入 0.333mol/L 的高锰酸钾溶液 25ml,振荡 1h。空白试验同时进行,3 次重复。振荡后样品离心 5min(转速 4000r/min),取上清液用去离子水按 1:250 稀释。然后将上述稀释液在 565nm 波长处理进行比色。根据消耗的 KMnO₄ 量,即可求出样品活性碳含量。土壤全碳用碳、氮自动分析-质谱联用仪(ANCA-NS)测定,全碳与活性碳的差值为非活性碳。

1.3.2 土壤碱解氮 碱解扩散法^[12]。

1.3.3 土壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾 常规分析方法^[12]。

1.4 土壤碳库管理指数计算方法

- 碳库指数(CPI)=样品全碳含量(mg/g)/参考土壤全碳含量(mg/g);
- 碳库活度(A)=活性碳含量/非活性碳含量;
- 碳库活度指数(AI)=样品碳库活度/参考土壤碳库活度;
- 碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100=CPI×AI×100。

2 结果与分析

2.1 红壤碳库管理指数

万方数据

表 1 施肥对红壤碳库管理指数的影响

Table 1 Effect of fertilization on C pool management index of red soil

处理 Treatments	活性碳(C_A) Active C (mg/g)	非活性碳(C_{NA}) Non- C_A (mg/g)	全碳(C_T) Total C (mg/g)	碳库活度(A) Activity of C pool	碳库指数(CPI) C pool index	活度指数(AI) Activity index of C pool	碳库管理指数* C pool mana- gement index
REF	1.05	6.51	7.56	0.161	1.00	1.00	100d
CK	0.62	5.6	6.22	0.111	0.823	0.686	56.5f
GM	1.51	7.24	8.75	0.209	1.157	1.293	149.7a
FYM	1.45	7.49	8.94	0.194	1.183	1.200	141.9b
FYM + NPK	1.19	7.24	8.43	0.164	1.115	1.019	113.6c
NPK	0.94	7.05	7.99	0.133	1.057	0.827	87.4e

* 字母相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著,邓肯检验 $p=0.05$,下同. The different letters in the same column mean significant differences by Duncan's multiple range test $p=0.05$. The same below

由表 1 可见,红壤活性碳、碳库管理指数受施肥影响明显。连续耕种 8a,与参照土壤相比,GM、FYM 和 FYM + NPK 3 个处理的土壤活性碳含量分别提高 43.8%、38%和 13.3%,而 NPK 和 CK 两个处理的 C_A 则下降 10.5%和 41%。施肥可增加土壤全碳含量。NPK 处理(单施化肥)尽管提高了土壤全碳含量,但与参照土壤相比,其土壤活性碳含量减少了 0.11mg/g,可见 NPK 处理土壤全碳含量的提高主要是因为土壤非活性碳含量提高所致。各处理对土壤碳库活度、活度指数、碳库指数的影响顺序均为 GM > FYM > FYM + NPK > REF > NPK > CK。统计分析表明,各处理对土壤碳库管理指数影响差异显著。与参照土壤的 $CPMI$ 相比,GM、FYM、FYM + NPK 3 个处理的 $CPMI$ 分别提高 49.7%、41.9%和 13.6%,而对照却下降了 43.5%,NPK 处理的 $CPMI$ 值仅为参照土壤的 87.4%,这说明连续施用有机肥料有利于提高红壤的 $CPMI$ 值,有机、无机肥料配施虽能提高 $CPMI$,但没有单施有机肥效果大,长期单施化肥或不施肥对保持和提高土壤碳库管理指数不利。

2.2 水稻土碳库管理指数

水稻土活性碳含量为 19.2 ~ 26.3mg/g,全碳含量为 19.2 ~ 26.3mg/g,普遍高于红壤,这与土壤管理措施及水土条件有关。淹水条件抑制了微生物对有机物质的分解加之大量秸秆还田导致了土壤碳素累积。另外,水稻土较红壤水土流失少,故水稻土的活性碳、全碳含量均高于红壤。连续 8a 不施肥,水稻土 A 值仅下降了 0.026, $CPMI$ 下降了 25.2%,而红壤 A 值下降了 0.050, $CPMI$ 下降了 43.5%,表明不施肥对红壤碳库活度及 $CPMI$ 的影响远高于水稻土。与参照土壤的 $CPMI$ 值相比,水稻土 RSC、FYM 和 FYM + NPK 3 个处理分别提高了 59.5%、47.7%和 30.1%,而 NPK、CK 两个处理却分别下降了 3.3%和 25.2%(见表 2)。施肥对水稻土 $CPMI$ 的影响顺序与红壤表现一致。

2.3 黄棕壤碳库管理指数

黄棕壤活性碳含量为 1.42 ~ 3.23mg/g,全碳含量为 11.1 ~ 20.9mg/g(见表 3)。各处理中,土壤碳库管理指数以 GM 处理为最大。连续耕种 8a 3 个处理的 $CPMI$ 值与参照土壤相比,GM、FYM 和 FYM + NPK 分别增加了 50%、45.9%和 21.9%,而 NPK 和 CK 两个处理却下降 6%和 38.1%。对比表 2、表 3 中相应各处理的 $CPMI$ 值可以看出水稻土比黄棕壤更加有利于 $CPMI$ 的提高。

2.4 潮土碳库管理指数

潮土全碳含量为 5.21 ~ 9.05mg/g,活性碳含量为 0.49 ~ 1.45mg/g,碳库活度为 0.099 ~ 0.191,均比红壤、水稻土、黄棕壤要低。不论是连续耕种 5a,还是耕种 10a 的土壤,施肥对土壤活性碳含量的影响均表现为 FYM > FYM + NPK > REF > NPK > CK。其中,连续单施 NPK 处理的土壤, A 值低于对照,这一点与红壤、水稻土、黄棕壤不同。这可能是潮土中 NPK 处理提高土壤非活性碳比例大于对照处理的缘故。长期单施 NPK,更易使潮土碳素老化,这与张付申等人的研究结果一致^[13]。与参照土壤的 $CPMI$ 比较,对照处理连续耕种 5a 时,土壤 $CPMI$ 平均每年下降 6.1%,连续耕种 10a,平均每年下降 4.84%。耕种 5a 时,FYM 和 FYM + NPK 两个处理的 $CPMI$ 平均每年上升 7.32%和 4.4%,而 NPK 处理却下降 3.38%,而耕种 10a,FYM 和 FYM + NPK 处理的 $CPMI$ 平均每年上升 6.5%和 4.17%,NPK 处理则下降 2.56%。不同处理对潮土碳库管理指数的影响为 FYM2 > FYM + NPK2 > FYM1 > FYM + NPK1 > REF > NPK1 > NPK2 > CK1 > CK2。

表 2 施肥对水稻土碳库管理指数的影响
Table 2 Effect of fertilization on $CPMI$ of paddy soil

处理 Treatments	活性碳 Active C (C_A) (mg/g)	非活性碳 Non- C_A (C_{NA}) (mg/g)	全碳 Total C (C_T) (mg/g)	碳库活度 Activity of C pool (A)	碳库指数 C pool index (CPI)	活度指数 Activity index of C pool (AI)	碳库管理指数 [*] C pool management index
REF	3.28	18.52	21.8	0.177	1.00	1.00	100d
CK	2.51	16.69	19.2	0.151	0.849	0.881	74.8f
RSC	4.99	21.31	26.3	0.234	1.322	1.206	159.5a
FYM	4.67	21.13	25.8	0.221	1.248	1.183	147.7b
FYM + NPK	4.18	20.72	24.9	0.202	1.139	1.142	130.1c
NPK	3.22	20.18	23.4	0.160	0.901	1.073	96.7e

表 3 施肥对黄棕壤碳库管理指数的影响
Table 3 Effect of fertilization on *CPMI* of yellow-brown soil

处理 Treatments	活性碳 Active C (C_A) (mg/g)	非活性碳 Non- C_A (C_{NA}) (mg/g)	全碳 Total C (C_T) (mg/g)	碳库活度 Activity of C pool (A)	碳库指数 C pool index (CPI)	活度指数 Activity index of C pool (AI)	碳库管理指数 [*] C pool management index
REF	2.25	13.25	15.5	0.170	1.00	1.00	100d
CK	1.42	9.68	11.1	0.147	0.864	0.716	61.9e
GM	3.23	17.67	20.9	0.189	1.112	1.348	150a
FYM	3.2	16.0	19.2	0.200	1.178	1.239	145.9b
FYM + NPK	2.73	15.57	18.3	0.175	1.033	1.181	121.9c
NPK	2.15	14.25	16.4	0.151	0.888	1.058	94d

表 4 施肥对潮土碳库管理指数的影响
Table 4 Effect of fertilization on *CPMI* of meadow soil

处理 Treatments	活性碳 Active C (C_A) (mg/g)	非活性碳 Non- C_A (C_{NA}) (mg/g)	全碳 Total C (C_T) (mg/g)	碳库活度 Activity of C pool (A)	碳库指数 C pool index (CPI)	活度指数 Activity index of C pool (AI)	碳库管理指数 [*] C pool management index
连续耕种 5a(Cultivated for 5a continuously)							
REF	0.91	5.97	6.88	0.152	1.00	1.00	100C
CK1	0.65	5.38	6.03	0.121	0.793	0.876	69.5e
FYM1	1.22	7.02	8.24	0.174	1.140	1.198	136.6a
NPK1	0.78	6.64	7.42	0.117	0.771	1.078	83.1d
FYM + NPK1	1.10	7.02	8.12	0.157	1.033	1.180	122b
连续耕种 10a(Cultivated for 10a continuously)							
REF	0.91	5.97	6.88	0.152	1.00	1.00	100b
CK2	0.49	4.72	5.21	0.104	0.681	0.757	51.6d
FYM	1.45	7.60	9.05	0.191	1.257	1.315	165a
NPK2	0.71	7.18	7.89	0.099	0.649	1.147	74.4c
FYM + NPK2	1.26	7.11	8.37	0.177	1.164	1.217	141.7a

表 5 土壤全碳、活性碳、A、AI、CPI、CPMI 与其它因子的相关性
Table 5 Correlationships among A ,AI ,CPI ,CPMI active C ,total C ,CPMI and other soil factors

相关因子 Related factors	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Hydrozyzed N	速效磷 Readily available P	速效钾 Readily available K	pH
A	0.664 **	NS	NS	0.577 **	0.452	NS	NS
AI	0.457 *	NS	NS	0.483 *	NS	NS	NS
CPI	0.486 *	NS	NS	0.514 *	NS	NS	NS
CPMI	0.865 **	0.503 *	NS	0.914 **	0.791 **	0.517 *	0.532 *
活性碳 Active C	0.771 **	NS	NS	0.837 **	0.529 *	0.498 *	0.465 *
全碳 Total C	0.451 *	0.336	NS	0.498 *	0.459 *	0.485 *	0.449 *

* * 表示极相关 means that correlationships reach extremely significant levels ,* 表示相关 Means that correlationships reach significant levels. NS 表示不相关 NS means no correlationships. n = 18 , $P_{0.05}$ = 0.444 , $P_{0.01}$ = 0.561

2.5 相关分析

从表 5 可以看出 ,CPMI 与土壤全氮、全磷、碱解氮、库效磷、速效磷、速效钾及 pH 相关或极相关。土壤活性碳、全碳、A、AI、CPI 仅与全氮、全磷、碱解氮、速效钾及 pH 部分相关或极相关。这说明 ,CPMI 与土壤养分因子的关系比活性碳 全碳 ,CPI、A、AI 与这些因子的关系更加密切。因此运用 CPMI 可以更好地反映出土壤养分肥力及碳素的动态变化。

3 讨论

上述结果可以看出 ,不同农田生态系统的土壤碳库容量 ,尤其是活性碳含量差异很大 ,土壤 CPMI 值受施肥处理影响明显。连续耕种、不施肥处理 ,土壤的 CPMI 值在红壤中下降最快 ,其次是黄棕壤 ,第三是潮土 ,最慢的是水稻土。这可能是红壤水热条件更适合微生物活动 ,CPMI 下降快^[14,15] ,水稻土与黄棕壤比较 ,水稻土有利于 CPMI 的保持和提高 ,这与淹水条件下 ,有机碳分解、转化较慢和水稻土基础肥力较高有关。而黄棕壤处于好气条件下 ,有机碳的矿化快 ,碳素损失大。另外 ,水稻土频繁的干湿交替也有利于活性碳的累积^[13,14]。不施肥导致 CPMI 下降有如下原因 :①每次土壤扰动 ,加速了有机碳的分解 ;②机械对植物残体的粉碎作用并使其充分地 与土壤混合 ,从而有利于有机物料的矿化 ;③不施肥使得归还给土壤的植物残体更少 ,新形成的有机碳不能补偿土壤原有有机碳的消耗 ,特别是活性碳的耗损 ,同时 ,微生物为维持自身生长 ,又要消耗一部分有效能源。

施用 FYM、GM、RSC 可显著提高土壤 CPMI 值 ,这与以下两方面有关 :①施入农田中有机肥(FYM、GM、RSC)矿化速率较慢 ,使得当年施入的有机肥在第 2 年施肥时 ,还有部分残留在土壤中 ;②施入土壤中的有机肥足以补偿原有土壤有机质的耗损 ,故连续施用 FYM、GM、RSC 能提高 CPMI。不同种类有机肥之间在提高 CPMI 方面效果不同 ,以 RSC 和 GM 好于 FYM ,这与有机肥料组成成分有关。RSC、GM(C/N = 19.9、13.3) ,含较多的水溶性、苯醇溶物质 ,而纤维、半纤维物质较少 ;FYM(C/N = 21.4) ,含较多的纤维、半纤维及木质素物质 ,而木质素的存在会降低其它组分的分解性^[15,16]。因此 GM、RSC 比 FYM 在提高 CPMI 方面效果要好。

同是施用 FYM ,在提高 CPMI 方面 ,以水稻土 > 红壤 > 黄棕壤 > 潮土。连续耕种 5a ,潮土 CK 和 NPK 两个处理的 CPMI 值平均每年下降 6.1%和 3.4% ,FYM、NPK + FYM 两个处理则分别上升 7.3%和 4.4% ,而连续耕作 10a ,对照和 NPK 两个处理的 CPMI 值分别平均下降 4.9%和 2.6% ,而 FYM 和 NPK + FYM 两个处理则上升 6.5%和 4.2%。不同耕种年限对 CPMI 影响明显 ,无论是 CPMI 上升 ,CPMI 下降 ,均表现为耕种初期变化较大 ,以后逐步变小。在研究的 4 种土壤中 ,NPK 处理的碳库活度均小于 1 ,活度指数大于 1 ,CPMI 小于 100 ,这是因为长期施用化学肥料 ,特别是 N 肥的大量使用 ,导致土壤活性碳消耗太快 ,活性碳的形成小于其消耗量 ,故比参 照土壤低^[3]。长期施用有机肥或有机无机配施对活性碳、非活性碳、总碳均有促进作用 ,是扩大土壤碳库、改善土壤有机质品质 ,提高土壤质量的有效途径。

上述讨论特别是相关分析表明,土壤碳库管理指数是反映土壤碳素动态变化灵敏而有效的指标,该指标为培肥地力、增加土壤活性碳含量提供了量化依据。因此,在土壤肥力及环境的可持续管理中土壤碳库管理指数值得重视和采用。

参考文献

- [1] 曹志洪. 化肥-环境与农业持续发展. 土壤科学与农业持续发展. 南京: 江苏科技出版社, 1994. 183 ~ 195.
- [2] 曹志洪, 朱永官, 等. 苏南稻麦两熟制下土壤养分平衡与培肥的长期试验. 土壤, 1995, 27(2): 60 ~ 64.
- [3] Blair G J and Lefroy R D B. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural systems. *Aust. J. Agri. Res.*, 1995, 46: 1459 ~ 1466.
- [4] Jenkinson and Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, 1977, 123: 298 ~ 305.
- [5] Dalal R C and Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. IV. loss of organic carbon from different density fractions. *Aust. J. Soil Res.*, 1986, 24: 301 ~ 309.
- [6] Loginow W W, Wismiewski S S and Ciescinska B. Fractionation of organic C based on susceptibility to oxidation. *Poli. J. Soil Sci.*, 1987, 20: 47 ~ 52.
- [7] Campbell C A and Zentner R P. Soil organic matter as influenced by crop rotation and fertilization. *Soil Sci. Am. J.*, 1993, 57: 1034 ~ 1040.
- [8] Powlson D S, Brookes P C and Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol Biochem.*, 1987, 19: 159 ~ 164.
- [9] Franzluebbers A J, Hons F M and Zuberer D A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N wheat management systems. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 26: 1469 ~ 1475.
- [10] Patra D D, Chand S and Anwar M. Seasonal changes in microbial biomass in soils cropped with palmarosa (*Cymbopogon martinii* L.) and Japanese mint (*Mentha arvensis* L.) in subtropical india. *Biol. Fertil. Soils.*, 1995, 19: 193 ~ 196.
- [11] Shan-min S, Brookes P C and Jenkinson D S. Soil respiration and the measurement of microbial biomass by the fumigation technique in fresh and air-dried soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 153 ~ 158.
- [12] 史瑞和. 土壤农化分析. 第二版. 北京: 农业出版社, 1990.
- [13] 张付申. 长期施肥条件下娄土和黄绵土有机质氧化稳态性研究. 土壤肥料, 1996, 6: 32 ~ 34.
- [14] 林心雄, 文启孝, 徐宁. 广州地区土壤中植物残体的分解速率. 土壤学报, 1985, 22: 47 ~ 54.
- [15] 林心雄, 程励励, 施书莲, 等. 绿肥和秆等在苏南地区土壤中的分解特征. 土壤学报, 1980, 17: 319 ~ 327.
- [16] 程励励, 文启孝, 吴顺龄, 等. 植物物料的化学组成和腐解条件对新形成腐殖质的影响. 土壤学报, 1981, 18: 360 ~ 367.