

不同施肥模式下潮棕壤微量元素含量及其变化状况

朱先进^{1,2}, 姜子绍¹, 马 强¹, 周 桦¹, 宇万太¹

(1. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 了解下辽河平原地区不同施肥模式对于土壤微量元素含量及其变化的影响。利用下辽河平原 18 年的定位试验, 对不同施肥处理下土壤中 Fe、Mn、Zn、Cu、Pb 的含量及其变化进行研究。下辽河地区所测微量元素含量均略低于全国平均水平, 长期采用常规施肥方式不会对土壤造成污染; 除了 Fe 以外, 试验前后所测元素的变化量在施肥处理与 CK 间均有显著差异, 而各元素的变化量在养分循环处理与化肥处理间无显著差异; 长期试验过程中, 对照处理除了 Zn 以外均表现出下降的趋势, 施肥处理除 Cu 以外均表现为增加的趋势; 重茬玉米地中 Cu 含量比豆茬玉米地高。下辽河平原地区不同施肥模式下微量元素含量均低于国家限定标准, 不会对土壤造成污染; 不同施肥模式下微量元素变化不同, 但养分循环再利用能够增加农田中微量元素的输入, 对于维持农田生态系统的可持续发展有重要意义。

关键词: 微量元素; 施肥; 养分循环; 潮棕壤; 茬口

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2009)增刊-0195-06

Effects of Different Fertilization Treatments on Contents and Changes of Trace Elements in Aquic Brown Soil

ZHU Xian-jin^{1,2}, JIANG Zi-shao¹, MA Qiang¹, ZHOU Hua¹, YU Wan-tai¹

(1. Institute of Applied Ecology, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Objectives of this paper are to elucidate the effect of different fertilization treatments on the contents and changes of trace elements in aquic brown soil. The effect was studied by a consecutive 18 years field trial on aquic brown soil in Shenyang suburb of Northeast China. The contents of trace elements in this area were lower than that of the national average, and there is no risk of pollution on soil under those fertilizations. Changes of contents of measured elements except Fe in soil between fertilization treatments and the control were significant, and there were no significant difference between the fertilizer treatment and the nutrient cycling treatment in those changes. All the measured elements except Zn declined during the trial under the control treatment, while all the measured elements except Cu increased under fertilization treatments. The content of Cu in the soil with continuous maize stubble was higher than that in the soil with soybean stubble. The contents of trace elements under different fertilization treatments in the lower reach of Liaohe Plain were lower than the environment quantity standard for soils, so those fertilization treatments can not make damage to the soil for a long time; And there are some differences in the changes of trace elements among treatments, while nutrients cycling can improve the inputs of trace elements in agroecosystem and has an important effect on the sustainable of agriculture.

Key words: Trace elements; Fertilization; Nutrients cycling; Aquic brown soil; Stubble

土壤中的微量元素是人类社会微量元素的主要来源, 其丰缺对于人类的健康有重要的影响^[1], 尤其是某些微量元素本身也属于重金属元素, 其含量过高会对人体的健康造成危害^[2], 因而, 各国对于土壤

环境制定了质量标准, 我国国家环保局于 1995 年发布了我国的土壤环境质量标准^[3]。

土壤中的微量元素含量受到诸多因素的影响, 最主要的影响因素为成土母质, 此外, 气候^[4]、地

收稿日期: 2009-03-04

基金项目: 中国科学院创新项目(KZCX2-YW-407, KZCX2-YW-405); 国家科技支撑计划课题(2006BAD05B05); 沈阳环境工程重点实验室基金(ERCERR08014)

作者简介: 朱先进(1985-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要从事农业生态学研究。

通讯作者: 宇万太(1964-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 主要从事农田生态系统养分循环研究。

形^[5]、人类活动^[6]等也是影响土壤中微量元素含量的重要因素。其中,关于人类活动对土壤微量元素的影响,前人的研究或集中在对土壤中有效态微量元素含量的影响上^[7,8],或集中于设施耕作对土壤微量元素的影响^[9],而在长期施肥对土壤微量元素含量的影响方面却少有研究。

下辽河平原是我国主要的商品粮基地,其土壤肥力状况一直是人们关注的焦点,然而前人的研究更多的集中在土壤中大量元素的变化上^[10-12],对于该地区土壤微量元素的动态研究较少。

因而,本试验以一组在下辽河平原进行了18年的长期定位试验为平台,就不同施肥模式下土壤中微量元素的含量及其变化进行研究,同时对各微量元素间的相互关系及不同茬口下土壤微量元素的含量进行阐述,以期了解不同施肥方式下土壤微量元

素的变化情况。

1 材料和方法

2.1 自然概况

田间试验在中国科学院沈阳生态实验站(41°32′N, 122°23′E)进行,该站处于下辽河平原中部偏东,属暖温带湿润半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,夏天炎热,冬天寒冷。年平均温度7~8℃,夏季平均气温24℃。年均≥10℃活动积温为3300~3400℃,太阳总辐射量为5409.9~5599.8kJ/cm²,无霜期147~168d。年降雨量平均600~700mm,年蒸发量1480~1756mm。

2.2 试验地基本性质

试验地土壤为草甸棕壤,试验开始时,土壤的主要理化性质及部分微量元素含量见表1和表2。

表 1 试验地的基本理化性质

Tab. 1 Main prosperities of the test soil

有机质/(g/kg) Total C	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	全钾/(g/kg) Total K	有效 P/(mg/kg) Available—P	速效 K/(mg/kg) Available—K	pH
20.9	1.13	0.44	16.4	10.6	88.0	6.5

表 2 试验开始时的土壤微量元素含量

Tab. 2 Contents of trace elements in soil
at the beginning of the trial

处理 Treatments	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb
CK	26434.0	596.32	51.20	25.96	25.84
M	26380.2	560.29	48.73	24.79	22.00
NPK	26167.1	574.76	48.15	24.47	21.11
NPK+M	26853.3	546.28	49.82	24.10	21.15
平均值 Average	26458.7	569.41	49.48	24.83	22.53
变异系数/%CV	1.09	3.75	2.71	3.24	9.98

2.3 试验设计

田间试验:试验开始于1990年,共设12个处理,根据本研究需要,选取其中4个典型处理:I.不施肥(CK);II.循环猪圈肥(M),每年收获籽实的80%喂猪,大豆秸秆全部和玉米秸秆的一半经粉碎后掺土垫圈,翌年春猪圈肥循环返回本处理,因此,本处理自1991年起每年施用猪圈肥;VII.化肥(NPK),氮肥用量为纯N150kg/hm²,用尿素折算,磷肥用量为纯P25.0kg/hm²,用重过磷酸钙折算,K肥用量为纯K60.0kg/hm²,用硫酸钾折算;VIII.化肥NPK+循环猪圈肥(NPK+M),NPK用量同VII,循环操作同II。

试验设3次重复,小区面积为162m²,轮作方式为大豆—玉米—玉米,其中大豆不施氮肥,玉米每年追施尿素。

本试验不同于一般的有机无机肥料配合试验,

它的有机肥料量来源于作物的生物学产量,循环回田的有机养分量与本处理作物吸收的养分量密切相关。确切地说,是完成了“施肥—作物吸收—喂饲、堆腐—制成堆肥—回田”这一循环过程^[13]。

2.4 样品采集与分析

每年作物收获季节,采用S形布点于每个小区随机采集0~20cm土层土壤样品,样品过2mm筛后风干贮存于干燥处待测。

样品分析方法如下:土壤中的全量Fe、Mn、Zn、Cu、Pb—HF—HNO₃—HClO₄消解,ICP—AES(Optima3000)测定;土壤全氮与全碳用元素分析仪(Vario EL IID)测定;全磷采用无水碳酸钠熔融法—钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法测定;速效磷采用0.5mol/LNaHCO₃—钼锑抗比色法测定;pH:用pH计;水土=1:2.5测定;其他测定项目均采用常规方法^[14]。

2.5 试验数据的分析方法

采用Microsoft office的Excel软件和SAS8.2对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤中微量元素含量及其生态安全评价

试验进行18年后,土壤中主要微量元素的含量如表3所示。

表 3 2007 年不同施肥处理下土壤微量元素含量

Tab. 3 Contents of trace elements in soil under different fertilization treatments in 2007						mg/kg
处理 Treatments	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	
CK	26039.2(1081.2)a	555.77(4.43)a	54.48(2.68)a	21.78(0.93)a	24.31(1.79)a	
M	26443.5(410.9)a	598.53(29.06)a	54.97(0.79)a	22.00(0.92)a	24.33(1.57)a	
NPK	26310.2(838.1)a	591.12(18.39)a	54.80(1.03)a	21.94(0.82)a	23.69(1.81)a	
NPK+M	27153.8(333.7)a	619.38(30.96)a	57.84(0.77)a	22.63(0.44)a	25.13(2.13)a	
平均 Average	26586.7	591.20	55.53	22.09	24.36	
变异系数/%CV	1.44	4.48	2.81	1.69	2.42	
全国平均值 The national average	29400.0 ^[15]	710.0 ^[4]	100.0 ^[4]	22.0 ^[4]	26.0 ^[15]	
当地背景值 ^[5] Backgrounds	28800.0	564.0	63.5	19.8	21.4	

2.1.1 土壤中的微量元素含量状况 从表 3 可以看出, 所测 5 种微量元素的含量大小顺序为: Fe> Mn> Zn> Cu、Pb, 该地微量元素的含量均略低于全国平均值, 而与当地背景值相比, Fe、Zn 含量略低, 而 Mn、Cu、Pb 含量略高, 这主要是由土壤母质的差异而引起的。

2.1.2 土壤中微量元素含量的变化量 将试验前后各处理微量元素的含量进行比较可得土壤中微量元素含量的变化量, 结果如表 4 所示。

表 4 试验前后不同施肥处理下土壤微量元素含量变化量

Tab. 4 Changes of contents of trace elements in soil under different fertilization treatments						mg/kg
处理 Treatments	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	
CK	-419.4a	-40.55c	3.28b	-4.18b	-1.53b	
M	63.3a	38.23b	6.24a	-2.79a	2.33a	
NPK	143.2a	16.36b	6.65a	-2.53a	2.58a	
NPK+M	300.5a	73.10a	8.03a	-1.47a	3.97a	

注: 小写字母不同表示 SSR 法差异显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: The letter means differences at 0.05 levels by SSR. The same as below.

从表 4 可以看出, 与初始状态相比, 对照处理除了 Zn 以外其他 4 个元素的含量均有所减少, 而施肥处理 (M、NPK、NPK+M) 除了 Cu 以外各元素的含量均有所增加。

统计分析表明, NPK+M 处理的变化量显著高于其他 3 个处理, M 处理和 NPK 处理的变化量也显著高于 CK 处理, 但 M 处理和 NPK 处理之间没有显著性差异; 至于各元素, Fe 的变化量在各个处理间没有显著差异 ($F=0.54, P>0.05$); Mn 的变化量在各个处理间有极显著差异 ($F=12.62, P<0.01$), Zn、Cu、Pb 在施肥处理与对照处理间均表现出显著差异 ($F=5.06, 5.83, 4.96, P<0.05$), 但施肥处理间 (M、NPK、NPK+M) 差异不显著。

2.1.3 微量元素的生态安全评价 与我国《土壤环境质量标准 GB15618-1995》中金属元素含量的一级标准 ($Zn\leq 100\text{ mg/kg}$, $Cu\leq 35\text{ mg/kg}$, $Pb\leq 35\text{ mg/kg}$)^[3] 相比, 该地所测 Zn、Cu、Pb 的含量均低于一级标准, 更是显著低于维持人体健康要求的二级

标准, 因而尚未对农田造成污染。对于 Fe、Mn 而言, 与当地背景值^[15] 相比, 其比值分别为 0.92 和 1.05, 说明该地区土壤的 Fe、Mn 含量也未对土壤构成污染威胁。综上表明, 四种施肥处理进行 18 年后仍不会对土壤构成威胁, 所以可以认为, 这四种施肥处理对于环境都是安全的。

2.2 不同施肥处理下微量元素含量变化趋势 土壤微量元素的变化受到输入与输出的共同影响, 由于不同处理土壤中微量元素的输入输出存在差异, 因而微量元素的变化趋势也有所不同, 其变化趋势如图 1~5 所示。

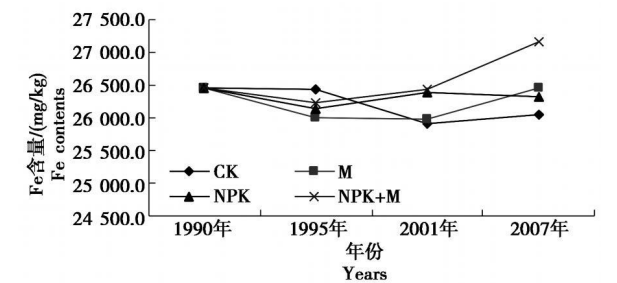


图 1 不同施肥处理下土壤中 Fe 含量变化趋势

Fig. 1 Trends of contents of Fe in soil under different fertilization treatments

从图 1~5 可以看出, 除了对照处理以外, Fe 的含量在其他各个处理中均略有增加, 但由于土壤中的 Fe 含量很高, 试验前后土壤中的 Fe 含量变动很小; 对于 Mn, 对照处理 Mn 含量因持续的输出而降低, NPK+M 处理 Mn 含量因输入量的增加而稳定增加, 而 M 处理和 NPK 处理总体呈上升趋势, 并且由于 M 处理 Mn 移出量较小, M 处理的 Mn 含量在试验后期开始高于 NPK 处理; 各个处理 Zn 的含量均表现出上升的趋势, 而 Cu 的变化恰恰相反, 各个处理 Cu 含量均有所下降; 土壤中 Pb 含量的变化也与其他元素的表现不同, 施加化肥的处理 (NPK、NPK+M), 土壤中的 Pb 含量在试验过程中呈升高的趋势, 而未施加化肥的两个处理表现略有不同, M 处理基本维持在初始状态, 而对照处理的 Pb 含量则表现出一定量的下降。

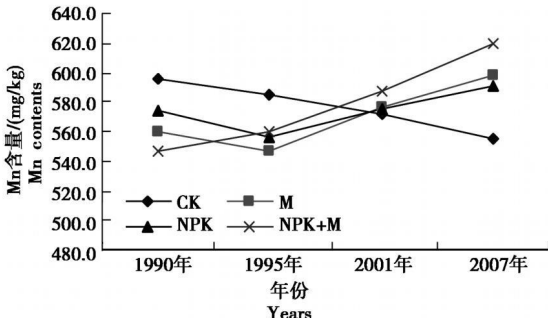


图2 不同施肥处理下土壤中 Mn 含量变化趋势

Fig. 2 Trends of contents of Mn in soil under different fertilization treatments

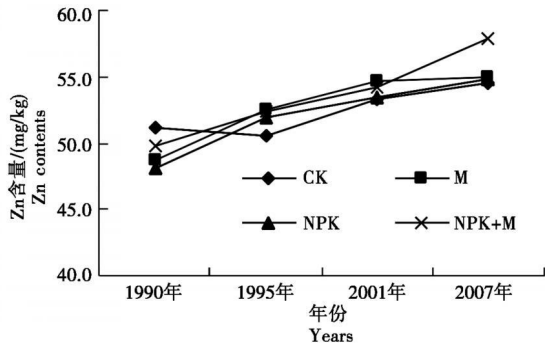


图3 不同施肥处理下土壤中 Zn 含量变化趋势

Fig. 3 Trends of contents of Zn in soil under different fertilization treatments

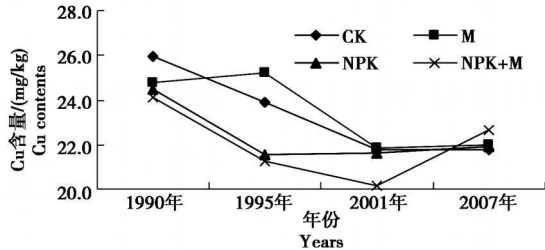


图4 不同施肥处理下土壤中 Cu 含量变化趋势

Fig. 4 Trends of contents of Cu in soil under different fertilization treatments

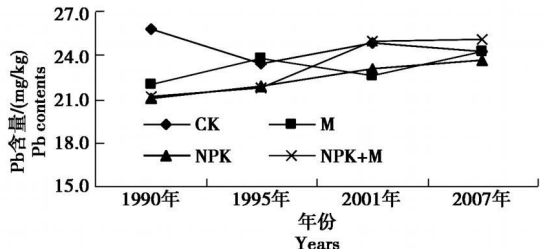


图5 不同施肥处理下土壤中 Pb 含量变化趋势

Fig. 5 Trends of contents of Pb in soil under different fertilization treatments

2.3 不同茬口下微量元素含量分析

作物移出是土壤中微量元素的主要输出,不同作物对于微量元素的移出能力有所差异。利用本试验的3个重复就不同茬口下土壤中微量元素的含量进行分析。统计结果表明,玉米重茬下土壤中的Cu

含量显著高于Cu在豆茬玉米地的含量($t=2.39$, $P<0.05$),而其他元素在不同的茬口间没有表现出显著的差异。

3 讨论与结论

所测5种微量元素的含量顺序($Fe>Mn>Zn>Cu,Pb$)与之前的研究结果^[16]相似,该地微量元素的含量均略低于全国平均值,较广东红壤的Zn、Cu、Pb含量^[17]也要低,而比黑龙江等地Zn、Cu、Pb的含量^[18]高,表明不同地区土壤中微量元素含量存在差异,也说明土壤母质是影响微量元素含量分布的主要因素;不同处理同一元素变化量不同,说明人类活动会对土壤中微量元素的含量产生影响,与此前的研究相符^[19]。

农田生态系统中微量元素的来源主要包括人为施肥及大气的干湿沉降。有研究表明,大气的干湿沉降是农田中微量元素的主要来源^[20,21],约占到微量元素总输入的25%~85%^[22,23],而施肥也是农田中微量元素的重要输入,其中化肥尤其是磷肥中含有各种微量元素^[24,25],而有机肥中微量元素的含量也很高^[2,26]。输出包括作物收获所带走的微量元素以及通过淋失等途径的损失。

不同元素在试验过程中体现出了不同的变化量和变化规律。对于Fe,对照处理Fe的持续下降源于作物收获带走大量的元素,通过大气沉降带入的Fe无法弥补作物收获所引起的亏损;而在施用循环猪圈肥后,Fe含量基本保持不变,这说明,虽然只有80%的营养参与循环利用过程当中,土壤中Fe含量仍能保持很高的水平;而NPK处理和NPK+M处理因持续的输入而导致Fe含量缓慢上升。对比试验前后的Fe含量可以发现,土壤中Fe的变动虽然最多达419 mg/kg,但相对于土壤中Fe的含量来说仍微乎其微,农田耕作方式对土壤中Fe含量的变化没有显著影响,这与史吉平等^[27,28]总结前人研究所得出的结论相一致,成对样本t检验的结果也证实了该结论,这主要是因为土壤中的Fe含量很高,而作物仅能吸收利用其中很小的一部分而造成的。

Mn的含量较Fe要低,但比其他3个元素要高。Mn含量的变化表现为CK处理下降,施肥处理(M、NPK、NPK+M)上升,这种趋势与任顺荣等^[19]研究所得结论一致。试验前后Mn含量发生显著变化,不同处理间的差异达到极显著水平,这主要是由于不同处理间在输入上存在差异。Pb与Mn的变化规律相同,这点在两者间的相互关系上有所体现,两者间有显著的相关关系,但Pb的变动幅度因其含量低

而更大。

Zn 和 Cu 含量在试验前后的变化截然不同, 相关分析的结果表明, 两者间有显著的负相关关系, 这主要是由于 Zn 和 Cu 在输入上的差异引起的, 虽然有机肥中 Zn、Cu 的含量大致相同^[29], 但不同元素的大气沉降速率各不相同, 且表现为: Fe>Zn>Mn>Pb>Cu^[30, 31], 由于农田输入的 Zn 量远大于因作物移出而带走的 Zn 量^[32, 33], 因此, 在 4 个处理中 Zn 的含量均呈现增加趋势, 且随着肥料和循环肥的施用而增加, Cu 恰与此相反。

微量元素变化量在 NPK 和 M 处理间无显著差异表明, 单纯养分循环再利用尽管不能满足作物的高产要求, 但却可以补充土壤微量元素的输出, 而在施用化肥的基础上实行养分循环再利用, 则既可以满足作物高产, 又可以补充微量元素, 使土壤微量元素含量保持在较高水平, 使产品的营养价值得到提升^[34], 因为微量元素如 Fe、Zn 等对人体是有益的, 即使是作为重金属的 Cu, 在含量较低的情况下对人体也是有益的, 同时也是人体所必需的^[35]。

不同茬口下土壤微量元素含量之间大都没有显著性差异, 这主要是由于作物移出的微量元素量较少, 同时土壤微量元素库相对较大, 作物移出量之间的差异并不会对土壤中微量元素的含量产生影响; 但不同元素也有不同表现, 比如 Cu, 由于重茬玉米的产量要低于豆茬玉米的产量^[36], 从而使重茬玉米地中 Cu 的移出量较低, 同时 Cu 在土壤中的含量相对较低, 导致作物收获对土壤中 Cu 的含量会产生影响, 所以重茬玉米地中 Cu 含量比豆茬玉米地高, 并且作物根茬对于土壤微量元素的有效性有一定的影响^[37], 因而不应忽视茬口对土壤微量元素的影响。

另外也应看到, 土壤微量元素浓度的变化较其本底浓度较小, 故有可能为试验误差所致。

潮棕壤微量元素含量略低于全国平均水平, 所测元素含量 Fe>Mn>Zn>Cu、Pb, 在长期采用养分循环及适量化肥输入的情况下, 不会对土壤造成污染。

除了 Fe 以外, 试验前后所测元素的变化量在施肥处理与 CK 间均有显著差异, 而各元素的变化量在 M 处理与 NPK 处理间没有显著差异。

在长期试验过程中, 对照处理所测元素含量除 Zn 外均有所降低, 而施肥处理(M、NPK、NPK+M)除 Cu 外均有所增加。大气沉降是 Zn 输入的主要部分, Cu 则主要来源于肥料输入。

作物茬口对于土壤中 Fe、Mn、Zn 和 Pb 的含量没有显著影响, 但重茬玉米地中 Cu 含量比豆茬玉米地高。

参考文献:

[1] Senesi G S, Baldassarre G, Senesi N, *et al.* Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health[J]. *Chemosphere*, 1999, 39(2): 343—377.

[2] Benke M B, Indranatne S R, Hao X Y, *et al.* Trace element changes in soil after long-term cattle manure applications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 798—807.

[3] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准[S]. In GB15618—1995, 1995.

[4] 万洪富, 钟继洪. 中国土壤微量元素肥力及其管理[M]// 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[5] 董杰, 杨达源, 周彬, 等. 三峡库区紫色土微量元素含量的变化[J]. *地理科学*, 2006, 26(5): 592—596.

[6] Adeli A, Sistani K R, Tewolde H, *et al.* Broiler litter application effects on selected trace elements under conventional and no-till systems[J]. *Soil Science*, 2007, 172(5): 349—365.

[7] Shuman L M. Effect of phosphorus level on extractable micronutrients and their distribution among soil fractions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1988, 52(1): 136—141.

[8] 魏孝荣, 郝明德, 邵明安. 黄土高原旱地长期种植作物对土壤微量元素形态和有效性的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3196—3203.

[9] 王国梁, 周生路, 赵其国, 等. 菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 79—84.

[10] 姜子绍, 宇万太, 张璐. 施肥对潮棕壤钾收支及钾在作物体内分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2337—2340.

[11] 宇万太, 关焱, 李建东, 等. 氮和磷在饲养—堆腐环中的循环率及有机肥料养分利用率[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1563—1565.

[12] 宇万太, 张璐, 殷秀岩, 等. 下辽河平原农业生态系统不同施肥制度的土壤养分收支[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1571—1574.

[13] 宇万太, 姜子绍, 沈善敏, 等. 不同施肥制度下潮棕壤钾素肥力变化和土壤缺钾指标[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2239—2244.

[14] 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.

[15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[16] Jahinuddin M, Harada H, Hatanaka T, *et al.* Status of trace elements in agricultural soils of Bangladesh and relationship with soil properties[J]. *Soil Science And Plant Nutrition*, 2000, 46(4): 963—968.

- [17] 徐金鸿, 徐瑞松, 苗 莉, 等. 广东红壤微量元素含量及分布特征[J] . 土壤通报, 2006, 39(5): 964—968.
- [18] 史文娇, 汪景宽, 边振兴, 等. 黑龙江北部土壤中主要重金属和微量元素状况及其评价[J] . 土壤通报, 2005, 36(6): 880—883.
- [19] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤微量元素含量的影响[J] . 生态环境, 2005, 14(6): 921—924.
- [20] Ali—Khodja H, Belaala A, Demmane—Debbih W, *et al.* Air quality and deposition of trace elements in Didouche Mourad, Algeria[J] . Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 138(1—3): 219—231.
- [21] Azimi S, Cambier R, Lecuyer I, *et al.* Heavy metal determination in atmospheric deposition and other fluxes in northern France agrosystems[J] . Water Air And Soil Pollution, 2004, 157(1—4): 295—313.
- [22] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* Quantifying heavy metal inputs to agricultural soils in England and Wales[J] . Water And Environment Journal, 2006, 20(2): 87—95.
- [23] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J] . The Science of The Total Environment, 2003, 311(1—3): 205—219.
- [24] Nziguheba G, Smolders E. Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries [J] . Science of The Total Environment, 2008, 390(1): 53—57.
- [25] McBride M B, Spiers G. Trace element content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP—MS [J] . Communications In Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(1—2): 139—156.
- [26] Larney F J, Olson A F, DeMaere P R, *et al.* Nutrient and trace element changes during manure composting at four southern Alberta feedlots[J] . Canadian Journal of Soil Science, 2008, 88(1): 45—59.
- [27] 史吉平, 张夫道, 林 葆. 长期定位施肥对土壤中、微量元素含量的影响[J] . 土壤肥料, 1999(1): 3—6.
- [28] Li B Y, Zhou D M, Cang L, *et al.* Soil micronutrient availability to crops as affected by long—term inorganic and organic fertilizer applications[J] . Soil and Tillage Research, 2007, 96(1—2): 166.
- [29] Doumad J Y, Jondreville C. Impact of nutrition on nitrogen, phosphorus Cu and Zn in pig manure, and on emissions of ammonia and odours[J] . Livestock Science, 2007, 112(3): 192—198.
- [30] Fang G C, Wu Y S, Chang T H. Atmospheric dry deposition fluxes of metallic pollutants in Asia during 1997—2006[J] . Environmental Forensics, 2008, 9(1): 15—21.
- [31] 刘素美, 黄薇文, 张 经, 等. 青岛地区大气沉降物的化学成分研究 I. 微量元素[J] . 海洋环境科学, 1991, 10(4): 21—28.
- [32] Dach J, Starman D. Heavy metals balance in Polish and Dutch agronomy: Actual state and previsions for the future [J] . Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 107(4): 309—316.
- [33] Bengtsson H, Oborn I, Jonsson S, *et al.* Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming — a case study at Ojebyn, Sweden[J] . European Journal Of Agronomy, 2003, 20(1—2): 101—116.
- [34] 刘更另. 营养元素循环与农业的持续发展[J] . 土壤学报, 1992, 29(3): 251—256.
- [35] 颜世铭. 有益微量元素与衰老[J] . 广东微量元素科学, 2007, 14(11): 15.
- [36] 宇万太, 马 强, 张 璐, 等. 不同施肥制度下茬口对作物产量增益、土壤养分状况及施肥贡献率的影响[J] . 生态学杂志, 2007, 26(11): 1798—1803.
- [37] 牟金明, 王明辉, 宋 日, 等. 作物根茬留田对土壤有效微量元素动态的影响[J] . 吉林农业科学, 1998(1): 59—61.