

## 长沙市茶园土壤和茶叶重金属的检测与评价

胡丹<sup>1,2</sup>, 张意<sup>1,3\*</sup>, 周冰玉<sup>1,2</sup>, 曾艳<sup>1,2</sup> (1. 湖南省微生物研究院, 湖南长沙 410009; 2. 湖南省农用微生物应用工程技术研究中心, 湖南长沙 410009; 3. 中国科学院微生物研究所, 北京 100101)

**摘要** [目的]了解长沙市茶场土壤及茶叶重金属的污染情况,为茶场无公害建设提供科学依据。[方法]分别测定长沙市的金井、湘丰、淳口、银峰和浏山茶场中某个茶园的土壤及茶树新叶、老叶的 Pb、Cu、Cr、Cd、Hg 和 As 6 种重金属元素含量,并结合茶场土壤和茶叶的卫生质量标准,使用单项污染指数和 Nemerow 综合污染指数对茶园土壤和茶叶进行评价。[结果]5 个茶园土壤和茶叶的 Pb、Cu、Cr、Cd、Hg 和 As 重金属元素含量均低于规定含量限定值,单项污染指数和 Nemerow 综合污染指数均小于 1.0。[结论]5 个茶园土壤环境总体良好,符合无公害茶场建设的条件;茶叶重金属含量在规定含量限定范围内,符合 1 级茶叶产品标准。

**关键词** 茶园土壤;茶叶;重金属;污染评价

**中图分类号** X833 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)14-0071-04

### Monitoring and Evaluating of Heavy Metals in Soil and Teas of Tea Garden in Changsha City

HU Dan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1,3</sup>, ZHOU Bing-yu<sup>1,2</sup> et al (1. Hunan Institute of Microbiology, Changsha, Hunan 410009; 2. Hunan Engineering Technology Research Center of Agro-Microorganisms Application, Changsha, Hunan 410009; 3. Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

**Abstract** [Objective] The research aimed to understand the heavy metals elements contamination in Changsha City, and to provide the basis for building non-polluted agriculture. [Method] We monitored the contents of heavy metals such as Pb, Cu, Cr, Cd, Hg and As in soil and teas of a Jinjing, Xiangfeng, Chunkou, Yinfeng and Weishan tea garden in Changsha City. Combined with health quality standard of tea gardens soil and tea, pollution of heavy metals was evaluated by single factor pollution index and Nemerow pollution index. [Result] The contents of Pb, Cu, Cr, Cd, Hg and As were fit the standard in garden soil, and the single factor pollution indexes and Nemerow pollution indexes were both less than 1.0. [Conclusion] Five tea gardens soil environmental quality was cleanness, and the soils were suitable for non-polluted agricultural production. The contents of heavy metals in tea leaves is within the limited range of the prescribed content and fits the first-level tea product standard.

**Key words** Tea garden soil; Tea; Heavy metal; Pollution evaluation

茶起源于我国,在全世界被广泛饮用,是全球三大饮料之一<sup>[1]</sup>。茶具有抗癌、抗氧化、清除人体自由基等保健作用<sup>[2-3]</sup>,越来越受到人们的喜爱。但是随着经济的发展,人们对茶叶的质量和功能有了更深入的了解,茶叶的重金属含量等安全问题受到密切关注。

我国是世界上最大的茶叶种植国,茶叶产量和茶园面积居世界第一。但是一些地区由于长期的矿产开采及化肥、农药的大量施用导致茶园的土壤重金属污染<sup>[4-6]</sup>,而重金属能够在茶树-土壤体系中迁移转化,最终富集在茶树组织,引起茶叶重金属含量超标<sup>[7-8]</sup>,人长期饮用受污染茶叶会对健康造成严重影响。

长沙市地处湘江流域,为大陆性亚热带季风湿润气候,气候温暖湿润,得益于得天独厚的地理条件,长沙市成为湖南省重要的茶产区之一<sup>[9]</sup>。湘江为湖南的母亲河,流经长沙市,是湖南赖以生存和发展的重要水系,但近年来多次受到重金属污染<sup>[10-12]</sup>,其周边土壤及农作物重金属含量令人担忧。笔者以湘江流域的长沙市为研究对象,对其中的茶园土壤及茶叶中 Pb、Cu、Cr、Cd、Hg 和 As 6 种重金属元素进行调查,了解长沙市的茶园土壤和茶叶是否受重金属污染,以期进一步为长沙市无公害茶叶的种植提供依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试验仪器** 原子吸收分光光度计(型号为 ICE 3500,美国 Thermo Scientific 公司);原子荧光分光光度计(型号为 AFS-8220,北京吉天仪器有限公司);微波消解仪(型号为 Mars 6,美国培安科技公司);电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(型号为 iCAP Q,美国 Thermo Scientific 公司)。

**1.2 样品采集及制备** 于 2016 年 9 月分别采集长沙县金井茶场和湘丰茶场、浏阳市淳口茶场和银峰茶场、宁乡市浏山茶场的某茶园土壤及茶叶样品。每个茶园在分散位置选取 5 个采样点,每个采样点在靠近茶树位置采用五点采样法,除去地表 5 cm 左右的覆盖物后采集其下 15~20 cm 的土壤约 0.5 kg,装至干净采集袋中。同时在每处土壤采样点采集该处茶叶,分别采摘嫩芽和成熟茶叶,分袋装好。土壤采集后自然晾干 7 d 后研磨过 60 目筛,保存备用。茶叶在 60 ℃ 烘干后用研钵研碎,过 60 目筛,保藏于塑料袋中备用。

**1.3 重金属含量测定** 精确称量土壤 0.1 g(精确至 0.1 mg),用王水-HClO<sub>4</sub> 消解,消解液中的 Pb、Cu、Cr 和 Cd 元素使用原子吸收分光光度计测定,Hg 和 As 元素采用原子荧光分光光度计测定。

精确称取茶叶粉末 0.5 g(精确至 0.1 mg)至聚四氟乙烯管中,加入 5 mL 纯硝酸和 0.5 mL 过氧化氢,放置微波消解仪中,消解程序为升温至 110 ℃ 保持 10 min,再升温至 180 ℃ 保持 15 min,冷却后去除多余酸液至 1 mL 左右,用超纯水定容至 50 mL 待测。采用电感耦合等离子体质谱仪测定茶叶中重金属的含量<sup>[13]</sup>。

**1.4 重金属污染评价** 采用单项污染指数和 Nemerow 污染

**基金项目** 湖南省重点研发计划(2017NK2144);长沙市科技局重大专项(KQ1703010);重金属污染耕地安全高效利用湖南工程研究中心开放研究基金项目(TGOP-001)。

**作者简介** 胡丹(1989—),女,湖南桃江人,助理工程师,硕士,从事环境重金属检测方面研究。\*通讯作者,助理研究员,博士,从事农业污染物检测及防治研究。

**收稿日期** 2018-03-06

指数结合的方法对重金属污染情况进行评价<sup>[2]</sup>,其分级标准见表1。经检测,采样地测定的土壤pH为4.1~5.2,土壤重金属含量限定值采用《土壤环境质量标准(修订)》(GB 15618—2008)(pH<5.5时)旱地土壤质量标准。茶叶中Pb

和Cu的限定值依据《绿色食品茶叶》(NY/T 288—2012)标准,Cr、Cd、Hg和As依据《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659—2003)标准,茶叶质量分级标准参照文献[14]。

表1 茶园土壤环境质量分级标准

Table 1 Grading criteria of tea garden soil environmental quality

等级 Grade	综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution grade	污染水平 Pollution level
1	$P_{综} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染超过其背景值,作物开始受污染
4	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物受到中度污染
5	$P_{综} > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

## 2 结果与分析

**2.1 茶园土壤重金属含量** 从5个茶园土壤样品重金属含量(表2)可以看出,各茶园土壤重金属含量不相同,平均值大小为Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg,其分布与土壤背景值的含量一致<sup>[15]</sup>。Pb含量,5个茶园土壤中Pb的含量基本上一致,平均含量为32.56 mg/kg,最高值为35.12 mg/kg,均低于限定值;Cu含量,平均为22.48 mg/kg,最高值为

29.05 mg/kg,均低于限定值;Cr含量,平均为56.81 mg/kg,最高值为68.44 mg/kg,均低于限定值;Cd含量,平均为0.202 mg/kg,最高值为0.237 mg/kg,均低于限定值;Hg含量,平均为0.161 mg/kg,最高值为0.226 mg/kg,均低于限定值;As含量,平均为10.47 mg/kg,最高值为11.88 mg/kg,均低于限定值。由此可知,长沙市这5个茶园土壤中Pb、Cu、Cr、Cd、Hg和As的含量均在限定值之内。

表2 茶园土壤重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in tea garden soil

茶园 Tea gardens	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	As
金井 Jinjing	32.72 ± 1.67	15.70 ± 0.09	48.11 ± 0.15	0.201 ± 0.003	0.071 ± 0.020	8.92 ± 0.77
湘丰 Xiangfeng	33.73 ± 1.06	29.05 ± 0.35	55.54 ± 4.36	0.214 ± 0.091	0.114 ± 0.009	11.33 ± 0.27
淳口 Chunkou	30.98 ± 0.52	25.23 ± 1.21	55.62 ± 4.36	0.237 ± 0.099	0.226 ± 0.042	10.67 ± 0.89
银峰 Yinfeig	35.12 ± 4.67	21.70 ± 2.38	68.44 ± 9.58	0.126 ± 0.027	0.221 ± 0.038	9.53 ± 1.03
浏山 Weishan	30.25 ± 1.11	20.72 ± 2.26	56.32 ± 3.24	0.232 ± 0.087	0.173 ± 0.084	11.88 ± 0.65
平均值 Average value	32.56	22.48	56.81	0.202	0.161	10.47
限定值 Limit value	80.00	50.00	120.00	0.250	0.250	45.00

**2.2 茶园茶叶重金属含量** 茶叶在生长过程中对土壤重金属具有富集作用<sup>[16]</sup>,采集土壤采样点周围茶树的茶叶,以检测茶叶重金属含量,结果如表3所示。结果显示,茶叶中6种重金属元素均未超出限定值,说明5个茶园茶叶中Pb、Cu、Cr、Cd、Hg和As 6种重金属元素的含量在安全范围内。但是,不同茶园的茶树各重金属元素具有差异,新叶Pb含量:湘丰>淳口>浏山>金井>银峰,老叶Pb含量:湘丰>金井>浏山>淳口>银峰;新叶Cu含量:金井>湘丰>银峰>浏山>淳口,老叶Cu含量:湘丰>金井>银峰>浏山>淳口;新叶Cr含量:湘丰=淳口>金井>银峰>浏山,老叶Cr含量:淳口>银峰>湘丰>金井>浏山;新叶Cd含量:湘丰>金井>银峰>淳口>浏山,老叶Cd含量:湘丰>银峰>金井>淳口>浏山;新叶Hg含量:淳口>银峰>金井>浏山>湘丰,老叶Hg含量:淳口>湘丰>金井>浏山>银峰;新叶As含量:湘丰>银峰>金井>浏山>淳口,老叶As含量:

湘丰>银峰>浏山>淳口>金井。同一采样点的新叶和老叶重金属含量也不一样,从表4可以看到,茶树新叶对Pb、Cu和Cd 3种元素的富集系数比老叶大,说明这3种重金属元素更容易积累在生长旺盛的新叶中,而Cr、Hg和As在新叶和老叶中富集并不表现出特定差异。土壤是茶树所积累重金属的主要来源,相比于其他5种重金属,茶叶对Cu的富集系数最高(表4),这可能是由于茶树对Cu的富集能力比较强,也可能与茶园所施肥料和喷洒农药有关<sup>[7]</sup>。

**2.3 茶园土壤和茶叶重金属污染评价** 茶园土壤的重金属污染评价结果如表5所示,根据表1的分级标准,金井和湘丰某茶园土壤的Nemerow综合污染指数分别为0.632和0.698,这2个茶园的土壤环境质量为安全清洁安全级别,淳口、银峰和浏山某茶园土壤的Nemerow综合污染指数分别为0.806、0.723和0.758,处于尚清洁警戒级别,满足无公害茶场建设要求。从单项污染指数看,5个茶园的Pb、Cu、Cr和

表 3 茶园茶叶重金属含量  
Table 3 Contents of heavy metals in tea

mg/kg

茶园 Tea gardens	茶叶样品 Tea samples	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	As
金井 Jinjing	新叶	0.72 ± 0.07	11.95 ± 0.64	0.55 ± 0.05	0.083 ± 0.006	0.048 ± 0.001	0.26 ± 0.06
	老叶	0.64 ± 0.01	9.95 ± 0.21	0.52 ± 0.06	0.019 ± 0.002	0.044 ± 0.003	0.33 ± 0.08
湘丰 Xiangfeng	新叶	0.92 ± 0.07	11.52 ± 4.83	0.60 ± 0.05	0.111 ± 0.001	—	0.48 ± 0.01
	老叶	0.89 ± 0.01	10.15 ± 0.49	0.55 ± 0.02	0.078 ± 0.003	0.047 ± 0.007	0.42 ± 0.03
淳口 Chunkou	新叶	0.77 ± 0.08	9.55 ± 0.21	0.60 ± 0.01	0.054 ± 0.007	0.068 ± 0.006	—
	老叶	0.56 ± 0.05	8.70 ± 0.53	0.95 ± 0.07	0.018 ± 0.007	0.062 ± 0.001	0.34 ± 0.04
银峰 Yinfeng	新叶	0.66 ± 0.01	11.35 ± 0.21	0.45 ± 0.07	0.065 ± 0.006	0.052 ± 0.005	0.40 ± 0.06
	老叶	0.46 ± 0.03	9.95 ± 0.35	0.65 ± 0.07	0.053 ± 0.004	—	0.37 ± 0.01
沩山 Weishan	新叶	0.77 ± 0.03	10.91 ± 0.42	0.35 ± 0.03	0.047 ± 0.007	0.026 ± 0.003	0.22 ± 0.04
	老叶	0.59 ± 0.09	9.80 ± 0.42	0.25 ± 0.07	0.014 ± 0.001	0.043 ± 0.001	0.36 ± 0.05
限定值 Limit value		5.00	30.00	5.00	1.000	0.300	2.00

注：“—”为未检出

Note: “—” is not detected

表 4 不同茶叶对重金属的富集指数

Table 4 Enrichment coefficients of heavy metals in different tea

茶园 Tea gardens	茶叶样品 Tea samples	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	As
金井 Jinjing	新叶	0.022	0.761	0.011	0.413	0.676	0.029
	老叶	0.020	0.634	0.011	0.095	0.620	0.037
湘丰 Xiangfeng	新叶	0.027	0.397	0.011	0.519	—	0.042
	老叶	0.026	0.349	0.010	0.364	0.412	0.037
淳口 Chunkou	新叶	0.025	0.379	0.011	0.228	0.301	—
	老叶	0.018	0.345	0.017	0.076	0.274	0.032
银峰 Yinfeng	新叶	0.019	0.523	0.007	0.516	0.235	0.042
	老叶	0.013	0.459	0.009	0.421	—	0.039
沩山 Weishan	新叶	0.025	0.527	0.006	0.203	0.150	0.019
	老叶	0.020	0.473	0.004	0.060	0.249	0.030

As 4 种重金属元素的污染指数都小于 0.6,说明 5 个茶场中这 4 种重金属处于清洁安全级别。淳口、金井、湘丰和沩山某茶园土壤 Cd 的单项污染指数大于 0.700,说明这 4 个茶园的 Cd 元素污染水平为尚清洁警戒级别,但接近轻度污染级别;淳口和银峰某茶园土壤中 Hg 元素的单项污染指数也超过 0.700,同样处于尚清洁警戒级别。由此可见,长沙茶园土壤的 Cd 和 Hg 含量应当引起重视,很有可能会达到轻度污染水平。比较郭海彦等<sup>[15]</sup>于 2005 年对长沙“百里茶廊”茶叶基地土壤重金属污染的调查情况,当时调查“百里茶廊”的 6

个基地土壤重金属含量仅湘丰茶场的 Cr 处于尚清洁警戒级别,其他茶场的重金属元素均为清洁安全级别,但到目前,所调查的 5 个茶场中有 4 个的 Cd 和 Hg 元素处于尚清洁警戒级别,表明长沙市茶园土壤重金属含量相较于 2005 年有所上升,应当引起重视。这可能与茶园农药喷洒、化肥施用以及灌溉水污染有关。因此,茶园管理者应重视土壤重金属的变化情况,同时采取相关措施,防止土壤重金属含量进一步增加。

表 5 茶园土壤重金属污染指数

Table 5 Pollution index of heavy metals in tea garden soil

土壤样品 Soil samples	单项污染指数 Single pollution index						Nemerow 污染指数 Nemerow pollution index
	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	As	
金井 Jinjing	0.409	0.314	0.401	0.804	0.284	0.198	0.632
湘丰 Xiangfeng	0.422	0.581	0.463	0.856	0.456	0.252	0.698
淳口 Chunkou	0.387	0.505	0.464	0.948	0.904	0.237	0.806
银峰 Yinfeng	0.439	0.434	0.570	0.504	0.884	0.212	0.723
沩山 Weishan	0.378	0.414	0.469	0.928	0.692	0.264	0.758

综上所述可知,所调查的长沙市茶园土壤重金属处于尚清洁警戒级别,进一步调查茶场土壤采样点茶叶重金属含

量,以了解茶叶是否也已受重金属污染,结果如表 6 所示,新叶和老叶的 Nemerow 综合污染指数小于 0.6,土壤处于尚清

洁警戒级别的几个茶场中 Cd 和 Hg 元素并未在茶叶中大量富集,其 Cd 和 Hg 元素的单项污染指数也较低,分别小于0.2

和0.3,达到1级茶叶产品标准<sup>[14]</sup>,说明所调查的5个长沙茶园茶叶未受重金属污染,在规定的标准范围内。

表6 茶叶重金属污染指数

Table 6 Pollution index of heavy metals in tea

茶园 Tea gardens	茶叶样品 Tea samples	单项污染指数 Single pollution index						Nemerow 污染指数 Nemerow pollution index
		Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	As	
金井 Jinjing	新叶	0.144	0.398	0.110	0.083	0.160	0.130	0.308
	老叶	0.128	0.332	0.104	0.019	0.147	0.165	0.259
湘丰 Xiangfeng	新叶	0.184	0.384	0.120	0.111	—	0.240	0.311
	老叶	0.178	0.338	0.110	0.018	0.157	0.210	0.266
淳口 Chunkou	新叶	0.154	0.318	0.120	0.054	0.227	—	0.258
	老叶	0.112	0.290	0.190	0.018	0.207	0.170	0.240
银峰 Yinfeng	新叶	0.132	0.378	0.090	0.065	0.173	0.200	0.296
	老叶	0.092	0.332	0.130	0.053	—	0.185	0.265
沩山 Weishan	新叶	0.154	0.364	0.070	0.047	0.087	0.110	0.275
	老叶	0.118	0.327	0.050	0.014	0.143	0.180	0.252

### 3 结论

(1)长沙市金井、湘丰、淳口、银峰和沩山5个茶园土壤中 Pb、Cu、Cr、Cd、Hg 和 As 重金属元素含量均低于含量限值,单项污染指数和 Nemerow 综合污染指数均小于1.0,说明这5个茶园符合无公害茶场建设的条件。但是,长沙地区茶园土壤为尚清洁警戒的数量,相较于2005年有所增加,应当引起重视。

(2)5个茶园茶树的老叶和新叶重金属含量处于限定值范围内,单项污染指数和 Nemerow 综合污染指数较低,茶叶重金属含量符合1级茶叶产品标准,但是茶叶中 Cu 元素的富集系数较高,应在茶叶施肥和喷洒农药等过程中注意 Cu 元素的控制,继续保证茶叶的质量。

### 参考文献

- [1] CABREA C, ARTACHO R, GIMÉNEZ R. Beneficial effects of green tea: A review [J]. *Journal of the American college of nutrition*, 2006, 25(2): 79-99.
- [2] 李云, 张进忠, 童华荣. 重庆市某茶园土壤和茶叶中重金属的监测与污染评价[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(7): 519-524.
- [3] JANKUN J, SELMAN S H, SWIERCZ R, et al. Why drinking green tea could prevent cancer[J]. *Nature*, 1997, 387(6633): 561.

- [4] 李仪, 章明奎. 杭州西郊茶园土壤重金属的积累特点与来源分析[J]. *广东微量元素科学*, 2010, 17(2): 18-25.
- [5] 张清海, 龙章波, 林绍霞, 等. 贵州云雾茶园土壤高含量重金属和砷在茶叶中的积累与浸出特征[J]. *食品科学*, 2013, 34(8): 212-215.
- [6] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷山茶园土壤重金属环境风险等级评价及溯源分析[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(4): 395-400.
- [7] 韩文炎. 茶树铜含量及其与土肥的关系[J]. *茶叶*, 1992, 18(4): 12-15.
- [8] 唐茜, 叶善蓉, 陈能武, 等. 茶树对铬、镉的吸收积累特性研究[J]. *茶叶科学*, 2008, 28(5): 339-347.
- [9] 余轩, 黄静, 欧阳林. 长沙市茶叶产业现状及发展思路[J]. *茶叶通讯*, 2011, 38(1): 35-37.
- [10] 杨霞, 彭渤, 吴雅弄, 等. 湘江湘潭段河岸沉积物重金属污染地球化学分析[J]. *地球化学*, 2016, 45(1): 62-76.
- [11] 胡杨, 许涛. 湖南湘江流域重金属污染现状及建议[J]. *民营科技*, 2016(8): 220.
- [12] 张立成, 董文江, 郑建勋, 等. 湘江河流沉积物重金属的形态类型及其形成因素[J]. *地理学报*, 1983, 38(1): 55-64.
- [13] 陈红梅, 张滨. ICP-MS 法测定茶叶中铅、铬、镉、砷、铜等重金属元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2011, 2(4): 193-197.
- [14] 李友勇, 梁名志, 田易萍, 等. 景洪市茶园茶叶和土壤中重金属的污染评价[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(15): 8972-8975.
- [15] 郭海彦, 周卫军, 张杨珠, 等. 长沙“百里茶廊”茶园土壤重金属含量及环境质量特征[J]. *环境科学*, 2007, 29(8): 2320-2326.
- [16] 方凤满, 王翔, 林跃胜. 皖南典型茶园茶叶中金属元素富集规律及其健康风险研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 229-235.

(上接第67页)

- [16] LI C S, XIAO X M, FROLKING S. Green house gas emissions from croplands of China[J]. *Quaternary sciences*, 2003, 23(3): 493-503.
- [17] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(2): 89-99.
- [18] ABDALLA M, KUMAR S, JONES M, et al. Testing DNDC model for simulating soil respiration and assessing the effects of climate change on the CO<sub>2</sub> gas flux from Irish agriculture[J]. *Global and planetary change*, 2011, 78(3/4): 106-115.
- [19] WATTENBACH M, SUS O, VUICHARD N, et al. The carbon balance of European croplands: A cross-site comparison of simulation models [J]. *Agriculture, ecosystems and environment*, 2010, 139(3): 419-453.
- [20] WANG W, GUO J X, OIKAWA A T. Contribution of root to soil respiration and carb on balance in disturbed and undisturbed grassland communities, northeast China[J]. *Journal of biosciences*, 2007, 32(2): 375-384.

- [21] 吴乐知, 蔡祖聪. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 118-121.
- [22] LI C S, FROLKING S E, HARRISS R C, et al. Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: A Florida case study[J]. *Chemosphere*, 1994, 28(7): 1401-1415.
- [23] BEER T, MEYER M, GRANT T, et al. Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from agriculture in relation to marketing and development. Irrigate maize: From maize field to grocery store [R]. Report HQ06A/6/F3.5, final report by CSIRO to the Australian Greenhouse Office, Grains Research and Development Corporation and CRC for Greenhouse Accounting, 2005.
- [24] KAHIMBA F C, RANJAN R S, FROESE J, et al. Cover crop effects on infiltration, soil temperature, and soil moisture distribution in the Canadian Prairies[J]. *Applied engineering in agriculture*, 2008, 24(3): 321-333.