

江汉平原农田生态系统 B 素循环及平衡分析

林匡飞^{1,2}, 徐小清¹, 项雅玲³, 韩纯儒⁴, 吴文良⁴

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 农业部环境质检中心, 武汉 430070; 4. 中国农业大学资源环境学院, 北京 100094)

摘要:以江汉平原农田生态系统为研究对象,通过对当地农户小麦-稻、稻-稻、油菜-大豆、油菜-花生、小麦-芝麻、小麦-棉花、青椒-大白菜、萝卜-茄子 8 种种植模式农田 B 素的输入、输出和平衡研究。结果表明,B 素的输出主要是作物收获,占 B 素总输出量的 44.8%~64.7%;其次是淋溶损失占 25%~41.4%,B 素流失占总输出量的 9.2%~17.4%。B 素的主要输入途径是施有机肥和 B 肥,此外,降雨也是 B 素输入的主要途径,该区域各种类型农田生态系统 B 素输入途径大小顺序为菜田:有机肥>降雨>灌溉>自然归还>无机肥>种子(种苗);水田和旱地:降雨>有机肥>灌溉>自然归还>无机肥>种子(种苗)。对 B 素平衡研究表明,该区 2 种菜田由于有机肥投入较大,普遍盈余,而 2 种稻田由于施用有机肥和秸秆还田归还许多 B 素,B 素亦基本平衡。而 4 种旱地有 1 种种植模式由于有 B 肥和有机肥的投入,B 素盈余较多,而另 3 种农田由于施化肥而不施有机肥和 B 肥,B 素出现不同程度的亏缺。

关键词:江汉平原;农田生态系统;B 素;输入输出;平衡

Balance of Boron in Farmland Ecosystem in Calcareous Alluvial Soil of Jiangnan Plain in Hubei Province

LIN Kuang-Fei^{1,2}, XU Xiao-Qing¹, XIANG Ya-Ling³, HAN Chun-Ru⁴, WU Wen-Liang⁴

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430072, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China; 3. Agro-Environmental Monitoring Center of Wuhan, MOA, 430070, China; 4. China Agricultural University, Beijing, 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(4): 520~527.

Abstract: There is certain threshold value of boron for a plant, below which a deficiency symptom will develop, and above which toxicity symptoms appear. A special attention is paid to boron among the essential mineral nutrients because the range between deficiency and excess is narrow. The proper boron input is closely related to the long-term stability of agro-ecosystems. From this perspective, the study on the input, output, cycling and balance of boron plays an important role in determining and optimizing the proper amount of boron fertilizers to be applied to various crops and in different cropping patterns.

The aim of the experiments reported in the paper was to analyse boron content of rainfall, irrigation water, various fertilizers and crops in agro-ecosystems of the Jiangnan plain, Hubei Province, and was to estimate the balance of boron in systems. In order to search for the balance of boron, the major eight cropping systems were established from April 1997 to May 1999. The major typical eight types of cropping systems were as follows: (i) wheat-rice rotation, (ii) rice-rice rotation, (iii) rapeseed-soybean rotation, (iv) rapeseed-peanut rotation, (v) wheat-sesame rotation, (vi) wheat-cotton rotation, (vii) pepper-cabbage rotation, (viii) radish-eggplant rotation.

Soil and plant samples were collected from eight testing plots. In each plot, 6 soil samples, and 6 samples of each of five different parts of the cropped plant (roots, stem, leaves, seeds and fruits) were collected and analyzed separately. Rain-fall was collected twice every two weeks. Runoff and leaching wa-

基金项目:EU(STD TS3 CT920065);FAO (TCP/CPR6611)

收稿日期:2000-01-11 **修訂日期:**2001-11-20

作者简介:林匡飞(1963~),男,博士,高级农艺师。主要从事污染生态学研究。E-mail:kflin@public.wh.hb.cn

ter was collected four times a month. Boron analyses were preformed according to analytical standards, using the Goldman curcumin colorimetric methods for boron in plant and soil, ICP method for low content of boron in water.

Results of chemical analysis showed that boron contents of water ranged 11.2 to 52.1 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, average 31.4 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Boron contents of organic fertilizers (manure 95.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, compost 104 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were higher than those of inorganic fertilizers (0.12~2.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). In the surveyed villages, the output amount of boron through harvests in various plants was showed below according to the order of significance: cabbage (256 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > radish (227 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > rapeseed (215 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > cotton (201 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > rice (139 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > eggplant (114 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > soybean (108 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > wheat (98 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > sesame (93 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > peanut (85 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) > pepper (70 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$).

An estimate of the total boron balance in the ecosystems showed that boron was mainly imported into the cropping systems with rainfall water, accounting for 338 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and 48.8% of the total boron entering the eight cropping systems (range 19.6% to 82.0%). Organic fertilizers represented a significant boron input to radish-eggplant rotation (67.4% of total boron), and pepper-cabbage rotation, where more than 76.3% of boron was imported through organic fertilizers. For wheat-rice and rice-rice rotation, boron was imported with organic fertilizers, accounting for 29.3% of total boron input (range 19.5% to 39.0%) in paddy rice field. Boron import accounted for 9.8%, 7.6%, 0.2%, respectively, through irrigation water, return of straws, seeds and / or seedlings input.

The aggregated data on the boron lost by the system through the harvest were listed in table 7 for eight cropping systems. Harvested boron ranged from 192 g/hm^2 in the wheat-sesame rotation system to 341 g/hm^2 in the radish-eggplant rotation system, accounting for 44.8%~64.7% of the total boron output. Leaching boron ranged from 132 g/kg in the radish-eggplant rotation system to 234 g/hm^2 in the rice-rice rotation system, accounting for 25%~41.4% of the total boron output. Body runoff boron ranged from 52 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the rapeseed-soybean rotation to 108 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the rice-rice rotation system, accounting for 9.2% to 17.4%.

The boron balance was positive in the pepper-cabbage and radish-eggplant rotation systems, where the yearly cycle ended with surplus of 1201 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 714 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively because of enough organic fertilizer import. There was surplus in the wheat-rice, rice-rice rotation system in paddy field because of using organic fertilizer. For rapeseed-soybean rotation system, there was more surplus because of boron fertilizer input (944 $\text{B g} \cdot \text{hm}^{-2}$). On the other hand, the balance of boron was negative, in rapeseed-peanut, wheat-sesame, wheat-cotton rotation systems in the four upland fields because of no organic and boron fertilizer input. As previously stated, the data we had tested show that the availability of boron in the future will become a limiting factor for agricultural productivity in the upland field without organic and boron fertilizers input, particularly for vegetables, rapeseed, and cotton, whose boron requirement is particularly high.

Key words: Jianhan plain; farmland ecosystem; boron; input and output; balance

文章编号: 1000-0933(2002)04-0520-08 **中图分类号:** S181 **文献标识码:** A

农田生态系统中营养元素循环与平衡的研究已经受到学者们广泛的关注,主要集中于氮、磷、钾三要素的研究^[1~7]。微量元素养分循环的研究虽有一些报道^[8,9],但涉及稻田、菜地生态系统多年的定位观测还不多见。微量元素 B 具有植物营养和污染危害双重作用的特性,目前, B 素的研究(包括土壤 B 素含量现状^[10]、B 肥应用和植物效应^[11,12]、丰缺诊断^[13,14]、人畜营养效应^[15]、土壤污染及危害^[16,17])取得了较大的进展。随着 B 肥应用面积日益扩大,研究其在土壤-植物系统中循环及平衡,维持 B 肥对作物适量供应,促进

农田生态系统 B 素的良性循环以及控制土壤污染均有重要意义。

湖北江汉平原是我国华中重要的商品粮棉油和蔬菜基地,是农业集约化程度较高地区,有许多学者曾对该区域的农业生态经济及氮、磷、钾、锌、锰循环进行了研究^[3,9,18,19]。由于本区为石灰土类型,土壤呈微碱性,微量元素有效成分含量较低,刘铮等^[10,13]认为石灰土由于土壤有效 B 含量低,加之,高温多雨,油菜和蔬菜作物长期连作重茬,B 素损失大。是易引起作物缺 B 的土壤类型。因此,本文选择江汉平原石灰土,对水田、旱地和菜地 8 种种植模式进行了研究。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 自然条件

试验地设在长江中游江汉平原腹地潜江市西郊的大桥和袁桥两个村,该区为暖温带季风气候,年平均气温 16.1℃,年均降雨量 1192mm,大于 10℃年积温 5117℃,年无霜期 254.3d。多熟制种植是该农业区的重要特点,多熟制种植形式多样,复种指数高,农田土壤为江汉冲积物^[3,18,19]。试验田土壤理化性状见表 1。试验田土壤为灰潮土,有石灰性反应,有机质含量低,土壤有效 B 含量处于低等水平。

1.2 试验设计

试验在两个试验村 8 个试验点进行,分别对 2 种水田、4 种旱地、2 种菜地的 8 种种植模式进行试验,种植模式、试验田面积和土壤理化性状见表 1,施肥与田间管理措施按当地典型方式进行。从 1997 年 4 月~1999 年 5 月,建立农户、定点田块 8 种种植模式的田间档案,记载农业生产过程和农药、化肥的投入及耕作情况。

农作物种植密度按当地典型方式进行,行株距(行距 cm×株距 cm)如下,早稻(13.2cm×16.5cm)穴插 4~6 株苗,每公顷 180 万苗;晚稻(13.2cm×20cm),穴插 3~4 株苗,每公顷 150 万苗;小麦(24cm×12cm),每公顷 240 万苗;油菜(33cm×23cm),每公顷 15 万株;大豆(33cm×20cm),每公顷 20 万株;花生(27cm×23cm),每公顷 25 万株;芝麻(35cm×30cm),每公顷 17 万株;棉花(80cm×42cm),每公顷 2.7 万株;青椒(40cm×33cm),每公顷 6 万株;大白菜(66cm×43cm),每公顷 3 万株;萝卜(25cm×20cm),每公顷 6 万株;茄子(50cm×55cm),每公顷 3 万株。

1.3 取样和测定方法

按播种或移栽期、收获期分小区 1m×2m 取种子、种苗、植株的样品,按株穴及样方挖取根茬及根系样品,一种种植模式田块按对角线法选取 6 个采样点,每种作物按根、茎、叶等分别采集 6 个样品,样品置于烘箱内,105℃杀青 25min,80℃烘干至恒重,然后测 B 含量。

凋落物收集方法,在试验田内设置 1m×1m×0.15m 的 6 个收集柜,按对角线设在试验地中,每 14d 收集 1 次,每 1 个月合并两次收集物。凋落物按叶、枝、果、半分解物分别装入尼龙袋,并分别称取各样品 250g 并混合,混合样品测定水分和 B 含量。按以上结果推算单位面积内凋落物干重和 B 总量。

1997 年 4 月~1999 年 5 月在试验区建立排水采集设施,在试验田分别设 4 个雨量器(MS-I 型),每月上、中、下旬各收集雨水和降尘 1 次;地面径流水从排水沟中收集,每月按上、中、下旬各收集 1 次;每田块在土壤剖面 50cm 处设置排水收集器(Lysimeter)逐旬收集渗漏水 1 次,以上水样按等分法混合 3 次样,每月测定 B 含量。灌溉水对主要河流及池塘一年测定 4 次。对有机肥、化肥分别取样并测定 B 含量。

土样在作物成熟期采集,每田块采集 6 个土样,植物和有机肥 B 含量干灰化后,用 1mol·L⁻¹HCL 提取,姜黄素比色法测定 B 含量。水样经过滤用 ICP 测定 B 含量,土壤全 B 王水(VHCL:VHNO₃=3:1)消解,冰醋酸-姜黄素比色法,土壤有效 B 和化肥中 B 含量用沸水浸提 ICP 法测定。

2 结果

2.1 农田生态系统 B 素输入

2.1.1 降雨及灌溉 B 输入 该区域雨水中 B 含量 11.2~38.4μg·L⁻¹,平均值 28.4μg·L⁻¹。该地区 1949~1994 年 45a 平均降水量为 1192mm,即年降雨输入 B 素为 338g·hm⁻²,该地区降水不均,作物生育期内还需补充灌溉,江汉平原农田多引灌长江汉水,汉水 B 含量为 16.3~35.4μg·L⁻¹,平均 26.1μg·L⁻¹,对本区水塘监测表明,B 含量为 14.3~42.4μg·L⁻¹,平均 29.2μg·L⁻¹。根据各种农田灌水量计算得各种种

植模式B素输入量见表3。

表1 8种植模式农田土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil in eight cropping systems

种植模式		面积 Area	土壤	机械组成 Mechanical analysis (mm, %)				
Cropping system		(m ²)	Soils	>0.02	0.02~0.002	<0.002	质地 Texture	
A 小麦-稻		976	灰潮土田 CAL *	49.4	34.0	16.6	壤土 Loam	
Wheat-rice								
B 稻-稻		560	灰潮土田 CAL	46.8	47.5	15.7	壤土 Loam	
Rice-rice								
C 油菜-大豆		873	灰潮土田 CAL	54.6	33.5	11.9	砂壤土 Sand loam	
Rapeseed-soybean								
D 油菜-花生		633	灰潮土田 CAL	67.3	26.2	6.5	壤土 Loam	
Rapeseed-peanut								
E 小麦-芝麻		780	灰潮土田 CAL	44.6	37.1	15.9	壤土 Loam	
Wheat-sesame								
F 小麦-棉花		627	灰潮土田 CAL	43.3	44.8	11.9	壤土 Loam	
Wheat-cotton								
G 青椒-大白菜		1167	灰潮土田 CAL	44.3	38.9	16.8	壤土 Loam	
Pepper-cabbage								
H 萝卜-茄子		853	灰潮土田 CAL	49.8	37.5	12.7	壤土 Loam	
Radish-eggplant								

种植模式		有机质	全 N	全 P	全 K	CEC	CaCO ₃	全 B	有效 B
Cropping	pH	Org. M	Tot N	Tot P	Tot K	(cmol(+)	(g · kg ⁻¹)	Tot B	Av. B
system		(g · kg ⁻¹)	(g · kg ⁻¹)	(g · kg ⁻¹)	(g · kg ⁻¹)	· kg ⁻¹)		(mg · kg ⁻¹)	(mg · kg ⁻¹)
A	8.29	14.3	0.79	0.85	18.3	18.4	27.7	50.9	0.32
B	7.75	13.2	3.33	0.77	16.1	16.5	14.5	57.9	0.35
C	8.25	6.15	1.00	0.61	18.1	9.2	28.3	64.7	0.39
D	8.15	5.41	0.85	0.66	16.9	17.6	31.7	54.4	0.22
E	8.39	6.76	1.14	0.78	18.7	18.9	31.3	57.2	0.38
F	8.23	10.7	1.42	0.67	21.7	16.8	24.1	36.0	0.21
G	7.57	11.1	1.49	1.16	18.2	19.2	19.9	59.4	0.45
H	7.86	10.2	1.21	0.89	21.5	18.6	24.9	69.7	0.41

* CAL-Calcareous alluvial loam

2.1.2 肥料B输入 表2列出江汉平原主要有机肥及化肥品种的B素含量,由此可见有机肥种类B素含量差异很大。各种种植模式施肥量及B输入量见表3,本区按水田平均施有机肥2589kg·hm⁻²计,有机肥料带入稻田的B量为258g·hm⁻²,菜田有机肥施用量较高,平均达到10.8t·hm⁻²,有机肥输入菜田的B量达到1076g·hm⁻²,而旱地基本上不使用有机肥。氮磷钾及复合肥B含量为0.12~2.45mg·kg⁻¹,差异较小,各种化肥品种按使用量计算,由化肥带入农田的B素为0.9~3.1g·hm⁻²。本区对油菜地有施B肥的习惯,种植模式B油菜-大豆使用了B肥,B素输入量678g·hm⁻²。

2.1.3 种子及自然归还B输入 8种植模式中根据种子的用种量及幼苗移栽量计算得B素输入量见表7,由此可见,种子和幼苗移栽输入的B素仅为0.2~2.2g·hm⁻²。根据对落叶根茬收集及测定结果表明,8种植模式根茬和落叶归还的B素为11.8~108g·hm⁻²,平均51g·hm⁻²。

表2 各种肥料中B含量分析结果(mg·kg⁻¹)

Table 2 Boron contents in different fertilizers

样品	Sample	n	含范围 B量	含 B量
			B range	B content
人畜粪便	Manure	20	43.1~260.5	95.1
杂肥	Compost	10	52.2~296.6	104
氮肥	N fertilizer	10	0.82~2.12	1.62
磷肥	P fertilizer	10	0.94~2.45	1.86
复合肥	Complex	10	0.67~2.32	1.52
氯化钾	KCl	5	0.12~0.34	0.22

表 3 8 种种植模式灌溉量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和施肥量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)及 B 的输入量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 3 Irrigation amount and input of fertilizer and boron in eight cropping systems

种植模式 Cropping system	灌溉 Irrigation		有机肥 Org.		化肥 Inorg.	
	用量 Amount	输 B 量 B input	用量 Amount	输 B 量 B input	用量 Amount	输 B 量 B input
A	4180	109	1278	128	1358	2.2
B	6000	156	3900	388	1716	2.9
C	2200	57	1200	120	944	1.3
D	2000	52	0	0	1864	3.1
E	1200	31	0	0	1397	2.3
F	2600	68	0	0	1751	2.9
G	2000	58	13200	1315	538	0.9
H	1800	52	8400	837	933	1.6

各种植模式 B 的输入量见表 7,由表 7 可见,在农田生态系统 8 种种植模式中,B 素主要来源于 B 肥及有机肥。在不施 B 肥和有机肥的种植模式中降雨和灌溉输入的 B 素占很大比例。而种子或种苗及无机肥的 B 素输入很少,两者不到 $5\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,研究结果与有关文献^[8]比较一致。

2.3 农田生态系统 B 素的输出

2.3.1 作物收获 B 输出 作物不同部位 B 素的含量研究表明(表 4),B 素在不同作物和同种作物的不同部位变化很大,从麦粒 B 含量 $2.57\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到油菜根 B 含量 $81.1\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从各种作物 B 含量比较,蔬菜和油料作物 B 含量较高,而禾本科作物 B 含量较低,许多学者^[12,17]认为双子叶植物比单子叶植物更需要 B 素,而十字花科和豆科植物又是最需要 B 的植物,这与本文研究较一致。

各种作物 B 素的收获量取决于作物产量和 B 含量,Shorrocks^[13]对甜菜、油菜、棉花、向日葵、苹果、紫苜蓿、小麦、葡萄、玉米等植物研究表明,一般作物 B 收获量低于 $100\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,而只有少数作物(如紫苜蓿、甜菜)B 收获量超过 $300\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,这与本文研究较一致。

从不同作物各部位 B 收获量可以看出,除了籽粒等经济部分带走 B 以外,通常有很大一部分 B 素存在于没有商品价值的作物部分(见表 5),经济产品带走 B 量大白菜最高,占 97.7%,其次是青椒,占 45.3%,小麦最低仅占 7.4%。作物收获带走总 B 量以大白菜输出最多,为 $256\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$,而青椒最少为 $69.6\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同作物 B 输出量大小顺序为大白菜>萝卜>油菜>棉花>水稻>茄子>大豆>小麦>芝麻>花生>青椒。

表 4 11 种作物干物质量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和不同部位 B 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)及收获 B 输出量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 4 Dry matter($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and boron Contents($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and harvested amount ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) in different parts of eleven plants

作物 Crop		样本 <i>n</i>	干物质 Dry matter	B 含量 B content	B 收获量 B harvest
水稻 Rice					
谷子	Grain	18	7636	5.88	44.9
稻草	Straw	18	5285	17.9	94.6
根	Root	18	1246	14.5	18.1
残留物	Remains	18	1993	17.9	35.7
小麦 Wheat					
麦粒	Grain	18	2836	2.57	7.3
麦秆	Straw	18	3665	22.8	83.6
根	Root	18	476	30.8	14.7
麦壳	Grain husk	18	350	21.4	7.5
残留物	Remains	18	481	22.1	10.6
棉花 Cotton					
茎和铃壳	Stem&bur	6	6160	24.9	153
根	Root	6	730	12.7	9.3
棉籽	Seed	6	1801	9.11	16.4
纤维	Fibre	6	1215	18.6	22.6
残留物	Remains	6	1145	16.2	18.5
油菜 Rapeseed					
油籽	Grain	12	2434	22.0	53.5
茎秆	Stem	12	4431	24.0	106
根	Root	12	367	81.1	29.8
籽荚	Pod shell	12	453	56.4	25.5
残留物	Remains	12	2048	12.6	25.8
花生 Peanut					
花生仁	Kernel	12	2412	12.1	29.2
茎	Stem	12	1563	12.3	19.2
根	Root	12	606	23.2	14.1
果壳	Pod shell	12	967	23.7	22.9
残壳物	Remains	12	603	8.14	4.9
大豆 Soybean					
豆粒	Kernel	18	2021	19.5	39.4
茎	Stem	18	1488	20.6	30.7
根	Root	18	365	18.0	6.57
豆壳	Pod shell	18	1138	27.3	31.1
残留物	Remains	18	867	33.5	29.0
芝麻 Sesame					
籽实	Grain	6	936	12.7	11.9
茎	Stem	6	2363	30.0	70.9
根	Root	6	476	21.8	10.4
残留物	Remains	6	587	26.5	15.6
大白菜 Cabbage					
叶	Leave	10	4266	58.6	250
根	Root	10	212	27.2	5.76
萝卜 Radish					
根	Root	6	1891	35.3	66.7
叶	Leave	6	2767	57.8	160
茄子 Eggplant					
果实	Fruit	10	1475	29.6	43.7
茎	Stem	10	2163	27.0	58.4
根	Root	10	610	19.9	12.1
青椒 Pepper					
果实	Fruit	10	1810	12.7	31.5
茎	Stem	10	965	29.9	34.4
根	Root	10	148	21.8	3.70

2.3.2 B素的渗漏及流失 研究区属于冲积砂壤土,保肥性能相对较差,对8种种植模式地表径流和深层渗漏测定结果见表6。B是土壤中极易淋溶的元素之一,尤其在酸性土壤中,本文研究结果与有关文献^[8,13,20]报道较一致,但由于本研究区属于微碱性石灰性土壤,B淋溶损失较酸性红壤土大为减少。

2.4 农田生态系统B素的平衡

表7可见,农田生态系统8种种植模式中水稻田两种种植模式B素盈余较多。而菜地两种种植模式中,由于以施有机肥、人畜粪便和饼肥为主,有机肥中含B量高,因此,菜地B素有很大盈余。旱地4种种植模式中其中C油菜-大豆模式施用了B肥和有机肥,使B素有较大的盈余;模式E小麦-芝麻由于作物吸收B素相对较少,虽然没有施有机肥和B肥,B素仍亏缺较少。而模式D油菜-花生和F小麦-棉花由于单施无机肥,没有施用B肥和有机肥,而油菜和棉花对B素需求较大,因此,B素亏缺较多。

3 讨论

农田生态系统B素的输入,输出及平衡研究表明,当地农田B素的输入主要有降雨、灌溉、施肥、种子(秧苗)和自然归还。江汉平原8种种植模式研究表明,该区域降雨是B素的主要来源,每年输入B素338g·hm⁻²,占B素输入总量的19.6%~82.0%,平均48.8%。因此,对于某些粗放经营和集约化经营的旱地和滩地由于往往很少施有机肥及B肥,降雨成为B素的主要输入途径。该区域菜田以施有机肥为主,该区域有机肥平均施用量11t·hm⁻²,由于有机肥中B素含量很高,菜田有有机肥B输入量占总输入量的67.4%~76.3%,平均71.9%,成为B素主要输入途径。该区水田一般施有机肥(约占总施肥量的30%),水田有机肥B素输入占总输入量19.5%~39.0%,平均29.3%,而旱田各种种植模式除种植模式C油菜-花生,施B素678g·hm⁻²,占B素输入总量的54.2%外,其它均施无机肥为主。研究表明,灌溉水带入的B量占B素输入总量3.4%~16.6%,平均9.8%。作物根茬及落叶的自然归还B素占B素总输入量0.7%~14.9%,平均7.6%。种子和秧苗输入农田的B素占B素总输入量的0.2%以下,占很小的比例。

农田B素的输入主要是作物收获带走,8种农田种植模式作物收获带走的B素占总输出量44.8%~64.7%,平均53.9%。其次是B素淋溶损失,其输出量占总输出量25.0%~41.4%,平均值33.9%。B素流失损失占B素总输出量9.2%~17.4%,平均12.2%。研究结果表明,对于菜地两种种植模式G青椒-大白菜、H萝卜-茄子,虽然菜地作物收获量大,作物B输出较多,但由于农民习惯大量施用有机肥(粪肥和饼肥)一般11t·hm⁻²,有机肥输入大量的B素,因此,不使用B肥的情况下,B素仍有较大的盈余。对于水田种植模式的A季稻-双季稻而言,由于补充30%左右的有机肥及稻草的1/3部分还田,大大增加了B素的输入,因此B仍有盈余。对于旱地4种种植模式,除模式C油菜-大豆由于施用了B肥B素有较大盈余外,

表5 11种作物收获B素输出量(g·hm⁻²)
Table 5 Boron output of eleven plants through harvests

作物 Crop	a	b	a/b(%)
水稻 Rice	44.9	139	32.2
小麦 Wheat	7.3	98.4	7.4
棉花 Cotton	39	201	19.4
油菜 Rapeseed	53.5	215	24.9
花生 Peanut	29.2	85.4	34.2
大豆 Soybean	39.4	108	36.5
芝麻 Sesame	11.9	93.2	12.8
大白菜 Cabbage	250	256	97.7
萝卜 Radish	66.7	227	29.4
茄子 Eggplant	43.7	114	38.3
青椒 Pepper	31.5	69.6	45.3

a. 经济产品带走B量 B output through economic products(g·hm⁻²) b. 作物收获带走B总量 B total output through harvests(g·hm⁻²)

表6 8种种植模式农田地表径流量(t·hm⁻²)和淋溶量(t·hm⁻²)及B素输出量(g·hm⁻²)
Table 6 Amount(t·hm⁻²) and boron output(g·hm⁻²) by runoff and leaching in eight cropping systems

种植模式 Cropping System	地表径流 Runoff			淋溶 Leaching		
	径流量 Amount	浓度 Content	输出 Output	渗漏量 Amount	浓度 Content	输出 Output
A	2650	0.027	71.6	3643	0.052	189
B	4168	0.026	108	4868	0.048	234
C	1865	0.028	52.2	3962	0.049	194
D	1901	0.029	55.1	3882	0.048	186
E	1922	0.031	59.6	4052	0.044	178
F	1892	0.030	56.8	3682	0.048	177
G	1742	0.034	59.2	3262	0.044	144
H	1689	0.032	54.0	3154	0.042	132

浓度 Content(mg·L⁻¹)

其它模式出现了不同程度的亏缺。为了保证农田生态系统 B 素的供应,应注意在旱地种植模式中多施用有机肥,约施 3~5t · hm⁻² 的有机肥,对需 B 较多的作物如油菜、棉花、果菜类蔬菜适当补充无机 B 肥(3.0kg · hm⁻² 硼砂),既保证了 N、P、K 的供应,又补充 B 素的不足。

表 7 8 种种植模式农田生态系统 B 素的平衡(g · hm⁻²)

Table 7 Boron balance of farmland ecosystem(g · hm ⁻²) in eight cropping systems								
项目 Item	A	B	C	D	E	F	G	H
输入 Input								
1. 有机肥 Org.	128	388	120	0	0	0	1315	837
2. 无机肥 Inorg.	2.2	2.9	1.3	3.1	2.3	2.9	0.9	1.6
3. B 肥 B fertilizer	0	0	678	0	0	0	0	0
4. 降雨 Rainfall	338	338	338	338	338	338	338	338
5. 灌溉 Irrigation	109	156	57	52	31	68	58	52
6. 种子 Seed	1.5	2.2	0.5	0.3	0.5	0.5	0.2	0.3
7. 归还物 Remains	78.5	108	54.8	30.7	40.3	71.7	11.8	12.2
8. 合计 Total	657	995	1250	427	412	481	1724	1241
输出 Output								
9. 流失 Runoff	71.6	108	52.2	55.1	59.6	56.8	59.2	54.0
10. 淋溶 Leaching	189	234	194	186	178	177	144	132
11. 作物 Harvest	237	278	323	300	192	299	320	341
12. 合计 Total	498	620	569	541	430	533	523	527
盈亏 Profit &. loss	+159	+375	+681	-114	-18	-52	+1201	+714

参考文献

[1] Qin Z P(秦祖平), Xu Q(徐琪), Xiong Y(熊毅), *et al.* Nutrient cycling in wheat-rice and barley-rice rotation systems of the Tai Lake region I, Removing and remaining of nutrients in the cereal grasses. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 1988, **8**(1): 10~17.

[2] Wang X X(王兴祥), Zhang T L(张桃林), Zhang B(张斌). Nutrient cycling and balance of sloping upland ecosystems on red soil. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(3): 335~341.

[3] Lin K F, Xiang Y L, Liu X F, *et al.* Loss of nitrogen, phosphorus, and potassium through crop harvests in agroecosystems of Qianjiang, Hubei Province, P. R. China. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, **18** (3) : 393~401.

[4] Chen J X(陈金湘), Liu H H(刘海荷). Studies on nitrogen cycling in cotton field ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报), 1998, **18**(4): 348~352.

[5] Cao G M(曹广民), Zhang J X(张金霞), Bao X K(鲍新奎), *et al.* The phosphorus cycling in an alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(4): 514~518.

[6] Zhang J X(张金霞), Cao G M(曹广民). The nitrogen cycle in an alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(4): 509~512.

[7] Luo L G(罗良国), Wen D Z(闻大中), Shen S M(沈善敏). Nutrient balance in rice field ecosystem of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(应用生态学报), 1999, **10**(3): 301~304.

[8] Cao C G(曹凑贵), Cai C F(蔡崇发), Zhang G Y(张光远), *et al.* Boron balance in agroecosystem on brown~red soil of south Hubei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese) (应用生态学报), 2000, **11**(2) : 228~231.

[9] Qian J H(钱金红), Xie X C(谢振翅), Xie Y F(谢炎坊). Balance and adjustment of zinc in paddy field ecosystem,

Acta Ecologica Sinica(in Chinese)(**生态学报**),1992,**12**(2):161~167.

[10] Liu Z(刘铮),Zhu Q Q(朱其清),Tong L H(唐丽华). Boron-deficient soils and their distribution in China. *Acta Pedologica Sinica*(in Chinese)(**土壤学报**),1980,**17**(3):228~239.

[11] Zou B J(邹邦基). Effect of micronutrients boron and zinc on crop nutrient balance. *Chinese Journal of Applied Ecology*(in Chinese)(**应用生态学报**),1992,**3**(3):280~285.

[12] Liu p(刘鹏), Wu J Z(吴建之),Yang Y A(杨玉爱). The research development of boron in Soil and its effect in plant. *Agro-environmental Protection* (in Chinese)(**农业环境保护**), 2000, **19**(2): 119~122.

[13] Shorrocks V M. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, 1997, **193** : 121~148.

[14] Bell R W. Diagnosis and prediction of boron deficiency for plant production. *Plant and Soil*, 1997, **193**:149~168.

[15] Nielsen F H. Boron in human and animal nutrition. *Plant and Soil*,1997,**193**:199~208.

[16] Nable R O, Banuelos G S, Paul J G. Boron toxicity. *Plant and Soil*, 1997,**193**:181~198.

[17] Gupta U C, Jame Y W, Campbell C A,*et al.* Boron toxicity and deficiency; a review. *Canadian Journal of Soil Science*,1985,**65**(3):381~409.

[18] Li J, Mario G, Gianni P,*et al.* Trends of technical changes in rice-based farming systems in southern China : case study of Qianjiang municipality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999 , **18**(3):283~297.

[19] Lin K F(林匡飞),Xu X Q(徐小清),Xiang Y L(项雅玲),*et al.* Manganese cycling and balance in farmland ecosystem of Jiang Han plain in Hubei Province. *Chinese Journal of Ecology*(in Chinese)(**生态学杂志**) , 2001,**20** (5):1~4.

[20] Cao C G(曹凑贵),Zhang G Y(张光远),Wang Y H(王运华),*et al.* Distribution,removing and regulation of boron in brown-red soil in the hilly region of south Hubei Province. *Acta Pedologica Sinica*(in Chinese)(**土壤学报**), 2001,**38**(1):96~103.