

# 鄂南丘陵区棕红壤硼的分布和迁移 特点及其调控\*

曹 凑 贵

张 光 远 王 运 华 蔡 崇 法

(华中农业大学农学系, 武汉 430070)

(华中农业大学资源环境与农业化学系)

**摘 要** 针对鄂南丘陵棕红壤区农业持续发展作物需硼问题,以集水面为单位和室内盆栽、人工模拟降雨试验相结合的方法,系统地研究了鄂南丘陵棕红壤区土壤硼的含量分布、形态和周年变化、动态规律及不同土地利用方式、耕作制度下土壤硼的迁移平衡规律,在此基础上建立了土壤硼循环的综合模拟模型。研究结果表明,同一集水面不同高程农田硼的分布、迁移和循环规律有一定差异;各形态硼的变化周期较为一致。热水溶性硼在集水面土壤中有明显的表层富集现象,在不同地形部位其系数有所不同。硼的表层流失以土壤体内向下淋失,受作物叶面积指数和土壤稳渗速率影响较大。

**关键词** 鄂南丘陵,棕红壤,硼,分布,平衡

**中图分类号** S153.6

硼是植物正常生长发育所必需的微量营养元素。我国南方棕红壤在高温多雨的气候条件下,硼素易被淋溶和流失,是我国缺硼较为严重的地区。该地区作物种类多样,复种指数高,种植制度复杂。土壤硼的有效性与土壤硼的存在形态及含量有关,而土壤硼的存在形态及含量分布直接受当地地理环境、地形、生态条件、耕作制度等因素影响<sup>[1]</sup>。本研究对鄂南丘陵区一典型集水面不同类型农田土壤含硼量进行了取样分析,以确定该地区典型地貌的农业土壤中硼的存在形态,时空分布,迁移特点及平衡规律,为硼肥的合理施用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究对象

本研究以湖北省咸宁地区贺胜桥镇一典型集水面为研究对象。该集水面上部为旱地、坡地,下部为水田,中下部为水旱轮作田。集水面的土壤为第四纪红色粘土发育的棕红壤。

### 1.2 研究方法

集水面不同部位耕作层土壤取样:1996年4月21日在贺胜桥镇一典型集水面按梯田和农田茬口特点用蛇形取样法取土样10个,采样点分布如图1。

\* 国家“九五”攻关课题“鄂南棕红壤丘陵区综合治理和持续发展试验区”(960040307)资助

收稿日期:1999-08-20;收到修改稿日期:2000-05-07

土壤剖面取样:在集水面顶部坡地、中部旱地、底部水田(如图 1),分别取土壤剖面土样,分析硼的剖面分布特征。

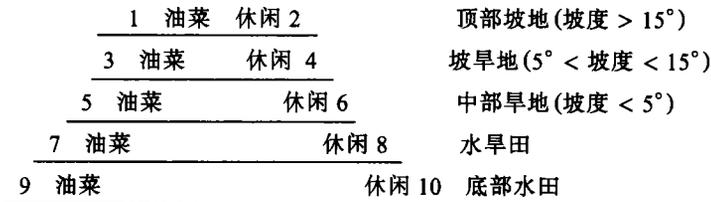


图 1 集水面取样布点图

Fig.1 Sample point distribution in the catchment

大田时间系列取样:从 1996 年 4 月 21 日开始至 1997 年 4 月为止,以旬(15~20 天)为时间间隔,分别在集水面顶部坡地、中部旱地、底部水田(如图 1)定点取土样。

人工模拟降雨:在供水压为 0.08MPa 下采用加拿大的下喷式模拟降雨机进行,降雨强度为 0.84mm/min,降雨试验槽种植大豆以控制覆盖度,覆盖度用叶面积指数表示,叶面积用求积仪测定。每次降雨前分别测大豆叶面积、土壤含水量、土壤容重。降雨过程中,始终接纳径流量,从产流开始,每隔 3min 计量一次径流量,并取样测含硼量。

农田硼素的输入、输出特征:于 1996 年 4 月开始至 1997 年 5 月间在试验区建立排水采集系统<sup>[2]</sup>,接纳渗漏排水,取样测硼淋溶损失量;不同季节取雨水、自来水、水库、水塘、水沟的水样,取各种有机粪肥样品,分析其含硼量,并调查分析期间的气象资料。

计算机模拟:根据系统动力学原理,设计 Dynamo 程序,建立土壤—植物系统硼素循环的动态模拟模型,通过调控模拟试验寻找理想的硼循环管理模式。

### 1.3 测定方法

植物全硼:1mol/L HCl 提取振荡两小时,姜黄素比色法。

热水溶性硼:2:1 的水土比,热水煮沸 5 分钟提取,过滤,姜黄素比色法。

土壤硼的分级提取<sup>[3]</sup>:0.02mol/L CaCl<sub>2</sub> 溶液振荡 24 小时提取,草酸姜黄素比色测交换态硼;顺序加 0.1mol/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液振荡 24 小时提取,草酸姜黄素比色测吸附态硼;顺序加 0.3mol/L 盐酸羟胺溶液振荡 24 小时提取,冰醋酸姜黄素比色<sup>[4]</sup>测专性吸附硼;顺序加 0.05mol/L HNO<sub>3</sub> + 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液振荡 24 小时提取,冰醋酸姜黄素比色测有机硼。

土壤全硼:王水(V<sub>(HCl)</sub>:V<sub>(HNO<sub>3</sub>)</sub> = 3:1)分解土样<sup>[5]</sup>,冰醋酸姜黄素比色法<sup>[4]</sup>。

## 2 结果分析

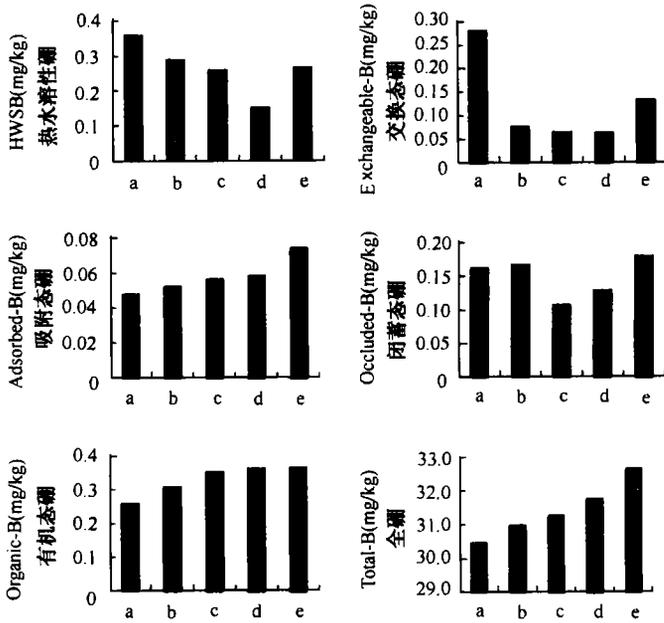
### 2.1 集水面不同地段耕作层土壤硼的构成与分布

在同一集水面阶梯系列的梯田(如图 1)上,由于农业利用方式、作物种植制度不同,不同地段环境特点不同,使耕作层土壤中硼的组成和分布在不同地段上有较大的差异。从表 1 可以看出土壤硼绝大部分以矿物态存在(96.38%~97.60%),热水溶性硼(HWSB)、交换态硼、吸附态硼、闭蓄态硼、有机态硼分别只占全硼的 0.48%~1.17%、0.20%~0.92%、0.16%~0.23%、0.41%~0.55%、0.84%~1.14%。

从图 2 可以看出,在同一集水面梯田系列的耕层土壤中,热水溶性硼(WHSB)的含量

并没有表现在坡底积累的现象,与此相反,顶部旱地土壤的热水溶性硼浓度高于底部水田,中下部水旱轮作田 WHSB 浓度最低,WHBS 的分布表现为自上而下呈递减的趋势,而在坡底水田 WHSB 含量又有所回升,这可能与降雨、水分分布及水分动态变化等因素有关。另外,还与吸收利用方式有关,因为当地高位旱地复种指数在 200% 以下,下部水田和中下部水旱轮作田的复种指数近 300%。交换态硼的变化趋势与 WHSB 相似。吸附态硼以水田土壤浓度明显高于其它地段耕层土壤,表现为从坡顶到坡底的迁移积累现象。闭蓄态硼、有机态硼、土壤全硼都有从坡顶到坡底的上升趋势,可能与硼的迁移积累有关,有机态硼主要以土壤有机质含量有关,下部水田有机质分解缓慢,有机质含量较高。

根据中国科学院应用生态研究所的研究,我国黑龙江五营暗棕色森林土从山地顶部至下部缓坡的不同地形部位中硼的迁移积累率逐渐增加,因为地表径流顺坡而下,随着下渗水在表土下层的移动,使硼发生迁移,在坡底产生积累<sup>[6]</sup>。而集水面梯田农业土壤中硼的迁移积累规律与此不同,除了吸附态硼、闭蓄态硼、有机态硼、全硼有向下迁移积累的趋势外,WHBS 和交换态硼与此相反,表现为向坡底的递减趋势。因为集水面梯田农业土壤经常翻耕,地表径流沿沟渠带走硼素进入水体,同时农作物的收获带走大量的硼素。



a: 顶部坡地 Top ladder upland; b: 坡旱地 Hillside upland; c: 中部旱地 Middle ladder upland; d: 水旱田 Water and dry rotation field; e: 底部水田 Bottom paddy field.

图2 集水面不同地段各形态硼的分布

Fig.2 Distribution of different form boron in different position of the catchment

## 2.2 集水面硼的流失、垂直迁移及剖面分布

当地地表径流和水分入渗是硼素损失的重要方面。从径流和硼损失过程来看(表1),没有植被覆盖的裸地径流与硼流强度明显高于有植被覆盖的土壤,随着叶面积的增加,径流与硼损失强度逐渐趋缓。当叶面积指数接近1后就比较一致。土壤中有效硼的损失与地表径流具有极显著的关系。

旱地养分流失及地表径流量除与叶面积有关外,还与降水量、灌溉等因素有关,经变量筛选硼流主要受降雨量、叶面积和土壤含水量影响(见表2)。

硼的淋溶损失主要受水分入渗量和土壤可溶性硼浓度的影响,见表3。

由于集水面不同部位水分条件不同,硼流失、淋溶特点不同,使硼的剖面分布有较大

表1 不同叶面积下径流、硼流及入渗情况

Table 1 Runoff, boron loss and leaching under different leaf areas

叶面积指数 Leaves area index	累积径流量 Accumulative runoff (ml)	累积硼流量 Accumulative boron loss (mg)	入渗 Leaching (mm/min)	硼流与径流 的相关系数 Correlation coeffi- cient of runoff and boron loss	累积径流过程 Accumulative runoff equation	累积硼流过程 Accumulative boron loss equation
0	6525	0.1823	0.49	0.9626	$Q=3585.79+241.53T$	$B=-73.91+6.59T$
0.36	1481	0.0311	0.76	0.9982	$Q=-542.71+51.99T$	$B=-10.79+1.10T$
0.91	524	0.0222	0.81	0.9969	$Q=-344.48+18.25T$	$B=-10.90+0.70T$
1.54	488	0.0212	0.81	0.9889	$Q=-239.01+18.66T$	$B=-78.46+0.72T$
2.94	355	0.0203	0.82	0.9994	$Q=-159.42+12.50T$	$B=-61.81+0.52T$

$Q$ =累积径流量(ml);  $B$ =累积硼流量(mg);  $T$ =降雨历时(min);  $r_{0.01,9}=0.735$

表2 硼随径流量损失的影响因子及关系

Table 2 The effect of some factors on boron loss

B流 Boron loss ( $y_1, g/hm^2$ )	降雨量 Precipitation ( $x_1, min$ )	叶面积指数 Leaves area index ( $x_2$ )	土壤含水量 Soil water ( $x_3, \%$ )
21.31	34.08	0	11.53
3.636	31.62	0.36	17.99
2.595	30.43	0.91	10.25
2.478	31.81	1.54	27.52
2.373	32.36	2.94	16.70

硼径流损失量  $y_1=-66.9803+2.3596x_1-1.4492x_2-0.1383x_3$

表3 旱地硼淋溶与入渗量和土壤B浓度的关系

Table 3 The relation among boron leaching, leaching and soil boron content in the dryland

B淋溶损失 Boron leaching ( $y, g/hm^2$ )	入渗量 Leaching ( $x_1, m^3/hm^2$ )	土壤B浓度 Soil boron content ( $x_2, mg/kg$ )
4.045	425.516	0.2134
12.076	544.462	0.2467
17.290	488.209	0.3008
30.102	555.135	0.3485
38.694	553.054	0.4826
2.899	79.492	0.2339
13.151	175.700	0.4133
24.890	174.181	0.5425
73.109	209.718	0.8394
131.559	284.944	1.0362

B淋溶损失量  $y=-48.198+0.043x_1+146.053x_2$

表4 集水面不同农田土壤剖面及热水溶性硼含量

Table 4 Profile distribution and vertical moving of HWSB in different positions of the catchment

部位	A		B1		B2		富集系数	迁移量
Position	深度	热水溶性硼	深度	热水溶性硼	深度	热水溶性硼	Assembled coefficient	Transfer coefficient
	Depth (cm)	HWSB (mg/kg)	Depth (cm)	HWSB (mg/kg)	Depth (cm)	HWSB (mg/kg)		(%)
坡地	0~15	0.362	15~40	0.196	40以下	0.074	2.25	45.9
旱地	0~17	0.238	17~33	0.140	33以下	0.095	1.59	63.3
水田	0~20	0.381	20~40	0.169	40以下	0.092	2.05	49.4

注 富集系数=(A/B1+B1/B2)/2; 迁移量=(1-((A-B1)/A+(B1-B2)/B1)/2)×100%

差异。从表 4 可以看出,热水溶性硼在集水面土壤中的分布有明显的表层富集现象,富集强度是顶部坡地 > 下部水田 > 中部水旱轮作田,三种农田的富集系数分别是 2.25, 2.05, 1.59。中部水旱轮作田表层硼的富集相对较低,可能与硼的淋溶移动有关,中部水旱轮作田硼的迁移量为 63.3%,因为水旱轮作加剧土壤有机质的分解,从而加剧硼的淋溶和移动。顶部旱地淋溶最少,硼的迁移量为 45.9%,可能与该地区冬季干旱少雨,土壤含水量较低有关。一阶水田硼的表层富集以其耕层有机质积累有关,其迁移量为 49.4%。

### 2.3 农田生态系统硼素平衡

从表 5 中可以看出,当地农田硼素输入主要有降雨、灌溉、施肥、种子种苗和自然归还。化肥、种子种苗对硼的输入都比较少,除直接施用硼肥外,降雨、有机肥和灌溉成了硼素输入的重要组分。降雨输入占总输入的 23.25%~84.25%,对某些粗放经营的农田,降雨

表5 不同种植方式农田生态系统硼素平衡

Table 5 Boron balance in farmland ecosystem of different cropping patterns (g/hm<sup>2</sup>)

种植方式	油/豆-稻	麦/瓜-稻	油/玉米-稻	麦-芝麻	豆-芝麻
Cropping pattern	Rape/soy-bean-rice	Wheat/water-melon-rice	Rape/corn-rice	Wheat-sesame	Soybean-sesame
输入	降雨	433.73	433.73	433.73	433.73
	灌溉	92.36	84.22	46.67	24.9
	有机肥	472.5	630	236.25	210
	硼肥	847.5	0	847.5	0
	化肥	2.252	2.711	3.17	1.809
	种子	0.626	0.44	0.711	0.236
	自然归还	16.023	10.419	16.824	5.669
	输入合计	1864.991	1161.52	1548.945	676.344
输出	淋溶	645.14	645.14	348.54	348.54
	流失	502.14	502.14	296.59	296.59
	产品输出	67.04	58.86	72.38	22.81
	输出合计	1214.32	1206.14	717.51	667.94
盈亏	650.671	-44.62	867.435	8.404	-157.354

是硼素的主要输入来源。对于大多数农田来说,有机肥是硼素的主要输入,其输入占总输入的 10.14%~54.24%,灌溉输入占总输入的 3.01%~7.25%。此外,作物自然归还也是重要的输入,其输入占总输入的 0.84%~1.34%。农田硼素的输出主要是流失和淋溶,它们分别占总输出的 48.58%~53.49% 和 41.34%~41.40%,由产品输出的量相对流失、淋溶损失并不大,只占总输出的 3.41%~10.09%,五种植方式中有三盈二亏,盈的主要原因是油菜施硼砂的结果,如果除去油菜施的 7.5kg / hm<sup>2</sup>的硼砂,将出现三亏二盈,其中以大豆-芝麻亏损最大,从亏损来看主要是淋溶和流失,可见在种植制度中补充硼肥是极为必要的。

### 2.4 硼的时间变化及调控

根据大田时间系列土样分析,得到较有规律的结果(见图 3)。用谐波变化曲线拟合不同地段耕地土壤不同形态硼的年变化都达极显著水平。

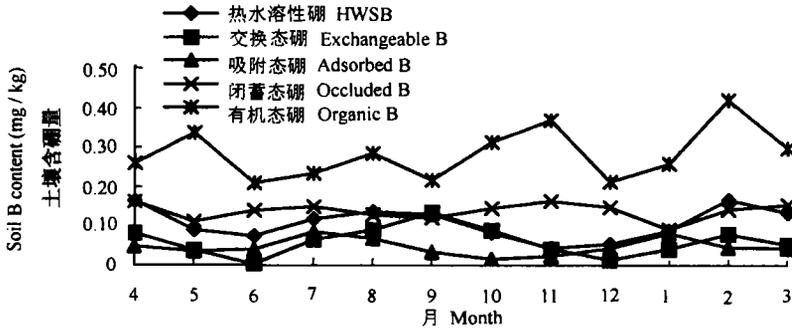


图3 底部水田各形态硼的年变化规律

Fig.3 Annual change of different form boron in the bottom paddy

表 6 是水田几种复种方式用 FESBSD 模型模拟的结果。从土壤有效硼和有机硼的数量动态可以看出,其变化是符合谐波变化曲线的,但多年连作模拟结果有下降趋势。从年

表6 水田各复种方式复种1年土壤有效硼和有机硼的数量动态

Table 6 The annual change of available boron and organic boron of paddy cropping patterns (g/hm<sup>2</sup>)

月 Month	有效硼 Available boron			有机硼 Organic boron		
	油/豆-稻	油/瓜-稻	麦/瓜-稻	油/豆-稻	油/瓜-稻	麦/瓜-稻
	Rape/soybean -rice	Rape/watermelon -rice	Wheat/watermelon -rice	Rape/soybean -rice	Rape/watermelon -rice	Wheat/watermelon -rice
4	598.5	598.5	598.5	823.05	823.55	823.05
5	701.78	764.66	764.66	813.66	802.62	802.62
6	643.39	989.62	861.75	804.41	782.76	782.76
7	719.6	728.25	1079.1	795.91	763.8	763.64
8	571.43	585.2	804.62	790.26	751.55	747.01
9	465.4	482.24	619.33	791.95	750.52	740.6
10	377.16	504.31	479.21	794.18	750.31	738.19
11	688.08	563.7	534.68	796.11	747.08	734.73
12	637.72	599.13	377.55	802.39	746.21	729.47
1	318.44	311.08	321.09	804.58	742.64	725.29
2	211.89	215.83	300.14	802.04	734.82	718.27
3	227.76	376.49	349.8	799.44	727.12	707.57

周期来看,土壤有效硼一年有两个高峰、两个低谷,第一个高峰在6~7月份,第二个高峰在11~12月,两次低谷分别出现在10月份与次年的2月份。从土壤有效硼含量来看,即使在高峰期其含量也只在 $0.47\text{mg}/\text{kg}$ 以下,仍低于通常作物的需硼临界值( $0.5\text{mg}/\text{kg}$ ),因此,可以推测有必要增加硼素的输入,特别是2月份的有效硼低谷期常是油菜需硼较多的时期,若在2月份施一次硼肥或农家肥将使土壤有效硼含量回升,使硼素年变化出现第三个高峰,这对油菜生长发育是极为有利的。旱地复种方式的模拟的结果表明土壤有效硼和有机硼的下降更快。而且有机硼变化的相位比有效硼早1个月。

### 3 结果与讨论

鄂南丘陵区棕红壤硼绝大部分以矿物态存在(96.38%~97.60%),热水溶性硼、交换态硼、吸附态硼、闭蓄态硼、有机态硼分别只占全硼的0.48%~1.17%、0.20%~0.92%、0.16%~0.23%、0.41~0.55%、0.84~1.14%。热水溶性硼含量0.152%~0.356mg/kg,属中低水平,仍属缺硼土壤,应适当补充硼肥,补施硼肥应因时,因地制宜。

鄂南丘陵区棕红壤农田生态系统的硼素分布规律明显不同于自然生态系统。依据集水面不同部位硼素分布特征的不同可将其分成三种类型:第一类为高塆旱地和坡地,含热水溶性硼较高,但有机硼、全硼和其它形态的硼含量较低,硼的植物有效性不高,该类型热水溶性硼存在最明显的表层富集现象,硼和垂直迁移系数比较小。在高塆旱坡地应补充有机肥,并改善水利及土壤条件,结合根外施硼肥,提高硼的有效性。第二类为中、低塆旱地,通常是有水则涝,无水则旱,水旱变化频繁,使该类型硼的垂直迁移较大,表层富集作用小,土壤含热水溶性硼是三种类型中最小的一类。在中低塆水旱轮作田补充无机硼肥。第三类为底部水田,该类型淹水时间较长,土壤有机质含量较高。虽然热水溶性硼次于高塆旱地,但其植物有效性最高,该类型的有机硼、全硼等各形态硼都较高。

鄂南丘陵区棕红壤各形态硼均按规律周期性变化,其周期变化是种植制度安排的重要参考和依据。如油/豆-稻可在头一年的11月份和次年的2月份分别施硼砂 $7.5\text{kg}/\text{hm}^2$ ,这不仅可避免油菜缺硼,还可以保持土壤有效硼的水平不下降。但在施硼砂一次超过 $15\text{kg}/\text{hm}^2$ 时可使土壤有效硼含量达到 $0.8\text{mg}/\text{kg}$ 。在轮作制中除了各复种中作物补充硼素外,还应注意轮作组成和轮作顺序,采用耗硼多与耗硼少,耗有机硼多与耗有效硼多的相互搭配。如水田轮作可采用油/瓜-稻-油/豆-稻-麦/瓜-稻。

### 参 考 文 献

1. 刘铮,欧阳洸. 华中丘陵区红壤中微量元素的供给情况以及与作物生长的关系. 土壤, 1975, (2): 76~85
2. 王德建,赵仁挺,刘元昌. 介绍一种采集土壤溶液的方法. 土壤, 1994, 26(1): 54~56
3. Hou J, Evans L J, Spiers G A. Boron fractionation in soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25(9&10): 1841~1853
4. 朱端卫. 土壤和植物中硼测定方法的概述. 土壤通报, 1995, 26(3): 142~143, 138
5. 杨永清. 用硼电极测定土壤中全硼. 土壤通报, 1982, (4): 42~43
6. 陈志诚. 土壤中硼的形态、移动及再分布. 见: 龚子同等. 土壤地球化学的进展和应用. 北京: 科学出版社, 1985. 224~232

## DISTRIBUTION, REMOVING AND REGULATION OF BORON IN BROWN-RED SOIL IN THE HILLY REGION OF SOUTH HUBEI PROVINCE

Cao Cou-gui Zhang Guang-yuan Wang Yun-hua Cai Chong-fa

(Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

### Summary

To aim directly at problem of crop demanding boron in sustainable agriculture development of brown-red soil in the hilly region of south Hubei Province, the content, forms, distribution, annual change, runoff, leaching and balance of the boron were analyzed. On the base of the synthetic analysis, the simulation model of boron cycling was set up. The results showed that distribution, removing and cycling of boron in different type farmland were different in the typical catchment, the period of annual change of majority form boron is six months, the surface assembled of HWSB is obvious, but the vertical transfer coefficient of HWSB was different in different type farmlands, boron loss of runoff and leaching were affected by leaves area index and stable leaching ratio principally.

**Key words** Hilly region of south Hubei Province, Brown-red soil, Boron, Distribution, Balance