

海河流域14种农作物对土壤库中磷的输出量和输入量初步研究*

蒋高明 黄银晓 林舜华 韩荣庄 高雷明

(中国科学院植物研究所, 北京 100044)

摘要 海河流域14种农作物平均含磷量为 $0.127 \pm 0.053\%$, 变化范围 $0.023—0.214\%$, 不同器官中最高可达 0.419% , 最低仅为 0.019% 。对土壤库中磷输出量最大者为谷子, 磷可达 $99.758 \pm 56.931 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 其次是玉米和棉花; 磷输入量以白薯为最大, 为 $12.557 \pm 5.020 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (但包括可食部分块根的输出部分在内), 然后是谷子和花生, 其余作物均较低, $< 2 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。具高输出量的作物的部位有玉米、谷子、花生、棉花等果实, 谷子、花生、白薯等茎叶; 就输入量而言, 除白薯为高输入和谷子为低输入类型外, 其余均属很低输入型, 上述特点揭示了海河流域因作物的收获而大量损失土壤库中的磷, 如种植谷子、玉米、棉花等分别以 99.758 、 32.661 和 $26.591 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率损失有效态磷。并对不同子流域作物磷的输出(入)量差异以及针对上述问题应采取的对策作了探讨。

关键词 磷; 输出量和输入量; 农作物; 海河流域

营养元素的生物地球化学循环是研究农业生态系统的重要内容(蒋高明等, 1993; Baker, J. L., *et al.*, 1975; Crisp, D. T., 1966; Hanway, D. B., 1975)。对于植物和动物生长不可缺少的养分是从土壤——植物——土壤这一简单模式进行的, 在这个生态过程中一般经过3个主要的库, 即植物、动物(或牲畜)和土壤。任一贮存库中, 一种养分的平衡状况, 可以从该养分净流入和净流出测算而得, 对于土壤库中的磷, 因为它的化合物在水中的溶解度很低, 水中的部分只占土壤和植物全磷的很小一部分(约1%)(M. J. 福里赛尔, 1981; Baker, J. L. *et al.*, 1975), 且磷很少加入大气循环, 因而植物从土壤库中输入和输出的部分是决定土壤磷素平衡的关键因素。

农业生态系统中不经施肥的大部分土壤往往都是缺磷的, 即使施肥, 也会因为收获农作物时从土壤库中带走大量的磷, 而从根系或枯落物回到土壤的磷却较少, 土壤缺磷就不可避免。海河流域是我国北方农业发展的重要基地之一, 但由于对土壤的不合理利用, 造成土壤贫瘠化、盐渍化和沙漠化, 土壤肥力下降, 磷素缺乏尤为明显(李鼎新等, 1992; 赵建强等, 1990; 蒋高明等, 1993)。本文从植物营养的角度分析海河流域常见14种农作物不同器官部位(根、茎、叶、果)的磷含量以及对土壤的输出量和输入量, 从而为研究农业生态系统中营养物质流和在实践中科学指导施肥提供依据。

本文于1993年7月收到, 1993年11月收到修改稿。

* 本文系中国科学院1986—1991年重大基础研究项目“海河流域C、N、S、P元素循环规律研究”中的部分内容。卢建婕女士协助绘图, 特此致谢。

1 研究方法

海河流域 ($35^{\circ}00' - 41^{\circ}30'N$, $112^{\circ}00' - 118^{\circ}30'E$) 面积达 260000km^2 , 汇集了蓟运河、潮白河、永定河、大清河、滹沱河、漳卫河 6 大水系, 包括河北、河南(部分)、山东(部分)、山西(部分)、内蒙古(部分)、北京、天津 5 省两市区域。从东到西分布有第四纪形成的海河堆积平原、太行山脉、燕山山脉及西部山西地堑系中的忻县盆地、大同盆地, 阳原-蔚县 3 大盆地, 海拔高度 $1 - 3058\text{m}$, 整个地势呈现西高东低的趋势。土壤以棕壤、褐土、潮土、盐土、草甸土等为主, 气候带处于暖温带落叶阔叶林区。农业植被以一年两熟和二年三熟作物为主, 主要种植玉米、小麦、高粱、谷子、大豆、棉花等(植物拉丁名参见表 1)。

利用路线踏视法驱车沿 3 条路线进行植被调查和样品采集: 第一次于 1988 年秋天沿北京—房山—望都—白洋淀—北京路线; 第二次于 1989 年夏天沿北京—张家口—大同一五台山—阜平—天津—廊坊—北京路线; 第三次于 1989 年秋天沿北京—灵寿—长治—滑县—聊城—衡水—沧州—北京路线(具体采样地点和时间参表 1)。按照农业生态系统作物总生物量根生物量的测定方法¹⁾, 先调查行株距和每丛苗数, 算出植株密度, 在选择的样地中选出 4 丛标准植株, 收获作物的活组织和死组织, 按茎、叶(或茎叶)、果称其鲜重; 对根系采集, 自上而下挖出植株根系分布最深处土壤, 以水冲洗取其根系, 称根的鲜重。 80°C 烘干至恒重, 称其干物质量, 并据此估算作物不同部位的干物质量、磷输出量和输入量。将分析样品粉碎后, 用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4(4:1)$ 消化, 然后用磷钼酸铵比色法测全磷量(蒋高明等, 1993)。本文选择有代表性的 14 种农作物进行数据分析, 从而探讨海河流域农业生态系统中土壤库中磷存量与作物收获的关系。

2 结果与分析

2.1 不同农作物含磷量、对土壤库磷的输出量和输入量

14 种农作物根、茎、叶、果含磷量及其对土壤库磷的输出量和输入量见表 1。从中可以看出, 在所有分析样品中, 农作物含磷量以山西长治陶清水库大豆果实为最高, 达 0.419% , 以河北衡水市高粱果实为最低, 仅仅为 0.019% , 说明了磷在不同植物体内变化范围很广, 两者相差 21 倍。从总的趋势来看, 果实的含磷量最高, 其次是叶和茎, 根最低(表 1)。

不同作物对磷的输出量变化于 $0.3\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 与 $99.8\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间(表 2), 造成这样的结果, 不仅与作物不同部位含磷量之间的显著差异有关外, 还与收获的不同作物部位生物量的巨大差异有关, 两者的差异最高可达 100 倍(收获量数据未在表 1 列出), 因此种植不同的作物及收获的部位决定了土壤库中磷(尤其是有效性磷)的贮存量变化大小。

不同农作物含磷量之间的差异也很明显, 其中以马铃薯含量为最高, 达 $0.214 \pm 0.065\%$, 水稻最低, 仅为 $0.023 \pm 0.008\%$ 。其中油料作物如花生、大豆、芝麻、油菜以及含脂肪较高的玉米等含磷量较其他作物为高, 这与这些作物(尤其是果实中)含较高的磷脂类物质有关。

对磷的输出量最大者是谷子, 达 $99.758 \pm 56.937\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 其次是玉米和棉花; 水

1) 中国科学院网络办, 1987; 中国生态系统研究网络指标体系观测与分析方法(植物部分讨论稿)。

表 1 海河流域不同采样点14种农作物不同器官部位含磷量, 输入量与输出量
 Table 1 The contents, inputs and outputs of phosphorus in different organs of the 14 crops
 sampled at different sites of the Haihe River Basin (1988—1989)

地 点 Sites	土壤类型 Soil type	植物种类 Species	生育期 Growth period	磷含量 P content(%)			输出量 Output(kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)			输入量 Input(kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)	
				根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit	茎 Stem	叶 Leaf		果 Fruit
北京良乡	褐土 ¹	玉米 ¹¹	成熟期 ¹⁵	0.074	0.110	0.240	0.250	6.626	4.348	21.750	1.444
北京房山长沟	褐土	水稻 ¹²	成熟期	0.110	0.180	0.150	0.150	2.520	0.630	0.836	0.836
河北望都县城	黄潮土 ²	大豆 ¹³	成熟期	0.200	0.190	0.200	0.320	1.578	1.680	4.665	0.441
河北安新白洋淀	盐化沼泽土 ³	高粱 ¹⁴	成熟期	0.024	0.031	0.042	0.057	1.240	0.574	2.552	0.655
河北官厅水库	褐土	玉米	营养期 ¹⁴	0.073	0.093	0.123	—	5.602	2.228	—	1.425
河北官厅水库	褐土	大豆	营养期	0.088	0.199	0.076	—	1.653	0.679	—	0.194
河北涿鹿县城	褐土	玉米	营养期	0.039	0.110	0.088	—	6.626	1.594	—	0.761
河北宣化市	褐土	玉米	营养期	—	0.184	0.223	—	11.083	4.040	—	—
河北张家口关水桥	潮褐土 ⁴	高粱	营养期	0.107	0.038	0.081	—	1.519	1.080	—	2.919
河北张家口关水桥	潮褐土	马铃薯 ¹⁵	开花期 ¹⁷	0.083	0.119	0.275	—	2.832	5.948	—	0.408
河北张家口关水桥	潮褐土	大豆	营养期	0.094	0.146	0.065	—	1.272	0.581	—	0.207
河北张家口关水桥	潮褐土	向日葵 ¹⁶	开花期	0.063	0.037	0.077	—	0.114	0.404	—	0.195
山西大同古定桥	潮褐土	玉米	营养期	—	0.236	0.381	—	6.903	3.638	—	—
山西山阴县岳庄	潮褐土	小麦 ¹⁷	成熟期	0.102	0.099	0.200	0.200	5.602	—	2.216	0.857
山西山阴县岳庄	潮褐土	谷子 ¹⁸	营养期	0.106	0.274	—	—	91.754	—	—	6.593
山西山阴县岳庄	潮褐土	玉米	营养期	—	0.089	0.045	—	5.361	0.815	—	—
山西山阴县北周庄	褐土	小麦	成熟期	0.071	0.034	0.061	0.061	1.924	—	0.676	0.596
山西怀仁县南希	褐土	油菜 ¹⁹	开花期	0.032	0.120	0.108	0.108	1.606	1.445	—	0.141
山西繁峙县	褐土	玉米	营养期	0.083	0.106	0.156	—	6.385	2.826	—	1.620
山西繁峙县	褐土	向日葵	开花期	0.068	0.083	0.121	—	0.255	0.064	—	0.211
山西五台山广济寺	褐土	苜蓿 ²⁰	营养期	0.092	0.086	—	—	0.489	—	—	0.258
山西五台山广济寺	褐土	马铃薯	营养期	0.077	0.129	0.116	—	0.307	3.158	—	0.378
河北阜平县	褐土	大豆	开花期	0.095	0.176	0.225	—	2.011	1.462	—	0.210
河北阜平县	褐土	玉米	营养期	0.078	0.180	0.241	—	1.084	4.365	—	1.522

河北省西乾德	黄潮土	花生 ²¹	开花期	0.113	0.195	0.192	7.569	7.452	3.043
河北省西乾德	黄潮土	玉米	营养期	—	0.158	0.179	9.517	3.243	—
河北省西乾德	黄潮土	白薯 ²²	营养期	0.133	0.190	—	13.534	—	9.474
河北省平乡县核桃村	黄潮土	花生	成熟期	0.194	0.198	0.219	7.685	8.500	5.225
河北省平乡县北郭村	黄潮土	玉米	营养期	—	0.127	0.206	7.650	3.372	—
河北省平乡县北郭村	黄潮土	棉花 ²³	开花期	—	0.121	0.227	5.041	11.694	—
河北省献县芦庄	盐化黄潮土	大豆	开花期	0.161	0.117	—	0.971	—	0.355
河北省献县芦庄	盐化黄潮土	玉米	开花期	0.155	0.201	0.267	12.107	4.837	3.025
河北省南皮县城	盐化黄潮土	谷子	开花期	0.054	0.098	0.342	3.282	11.318	3.359
河北省南皮县城	盐化黄潮土	玉米	开花期	—	0.141	0.140	8.493	2.536	—
天津市南大港水库	滨海盐土 ⁶	高粱	成熟期	0.058	0.107	0.026	4.279	0.357	1.582
天津市南大港水库	滨海盐土	大豆	开花期	0.091	0.128	0.245	1.063	2.190	0.201
天津市青县周官屯	盐土 ⁷	玉米	成熟期	0.043	0.136	0.223	8.192	4.040	0.839
天津市青县周官屯	盐土	高粱	成熟期	0.059	0.133	0.276	5.318	3.774	1.610
天津市杨柳青	盐化草甸土 ⁸	大豆	开花期	0.127	0.090	0.282	0.748	2.521	0.280
天津市杨柳青	盐化草甸土	高粱	开花期	—	0.184	0.190	7.358	2.598	—
天津市杨柳青	盐化草甸土	玉米	开花期	0.062	0.074	0.146	4.457	2.645	1.210
河北省廊坊市郊	盐化黄潮土	玉米	成熟期	0.077	0.099	0.295	5.963	5.345	1.503
河北省廊坊市郊	盐化黄潮土	玉米	成熟期	0.033	0.064	0.185	3.855	3.352	0.644
天津市清县马神庙	盐化黄潮土	芝麻 ²⁴	成熟期	0.073	0.069	0.180	2.111	6.199	1.577
天津市清县马神庙	盐化黄潮土	玉米	开花期	0.082	0.049	0.219	2.951	3.968	1.601
天津市武清县马神庙	盐化黄潮土	大豆	开花期	0.080	0.116	0.173	0.964	1.546	0.177
天津市武清县城南	盐化黄潮土	高粱	营养期	—	0.100	0.253	3.999	3.460	—
天津市武清县城南	盐化黄潮土	玉米	成熟期	0.042	0.044	0.117	2.650	2.120	0.820
天津市蓟县土岭头	盐化黄潮土	玉米	开花期	0.081	0.064	0.219	3.855	3.968	1.581
天津市蓟县土岭头	盐化黄潮土	水稻	开花期	0.081	0.324	—	4.147	—	0.616
天津市蓟县土岭头	盐化黄潮土	高粱	营养期	—	0.213	0.326	8.517	4.458	—
河北省大厂县城	盐化黄潮土	玉米	成熟期	0.080	0.119	0.080	7.168	1.449	1.561
河北省大厂县城	盐化黄潮土	大豆	开花期	0.145	0.144	0.269	1.196	2.404	0.320
北京密云水库	褐土	大豆	开花期	0.083	0.092	0.250	0.764	2.235	0.183
北京密云水库	褐土	高粱	成熟期	0.069	0.097	0.192	3.879	2.626	1.883
北京密云水库	褐土	谷子	成熟期	0.085	0.113	0.301	37.840	98.616	5.287

续表1 Continued from Table 1

地 点 Sites	土壤类型 Soil type	植物种类 Species	生育期 Growth period	磷含量 P content(%)			输出量 Output(kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)			输入量 Input(kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹)	
				根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit	茎 Stem	叶 Leaf		果 Fruit
河北灵寿黄壁庄水库	山地棕壤 ¹	高粱	成熟期	0.037	0.012	0.118	0.327	0.480	6.626	14.639	1.010
河北灵寿黄壁庄水库	山地棕壤	玉米	成熟期	0.022	0.052	0.192	0.220	1.015	3.479	19.140	0.429
河北灵寿黄壁庄水库	山地棕壤	大豆	成熟期	0.146	0.093	0.168	0.277	0.773	1.502	4.038	0.322
河北邢家湾水库	山地棕壤	白薯	成熟期	0.270	0.141	—	—	18.137	—	—	19.232
河北邢家湾水库	山地棕壤	棉花	成熟期	0.178	0.030	0.220	0.221	0.125	11.333	13.974	3.182
山西岳城水库	褐土	棉花	成熟期	0.074	—	0.163	—	—	8.397	—	1.323
山西岳城水库	褐土	谷子	成熟期	0.014	0.023	0.223	0.223	7.158	73.802	0.871	
山西长治陶清河水库	褐土	大豆	成熟期	0.077	0.058	0.221	0.419	0.482	1.975	6.108	0.170
山西长治陶清河水库	褐土	谷子	成熟期	0.080	0.104	0.238	0.238	32.368	78.766	4.976	
山西长治陶清河水库	褐土	玉米	成熟期	0.065	0.122	0.239	0.350	7.348	4.330	30.450	1.269
山西长治陶清河水库	褐土	玉米	成熟期	0.069	0.083	0.187	0.263	4.999	3.888	22.881	1.347
河南汲县柳园坡	潮褐土	棉花	成熟期	0.077	0.065	0.199	0.246	2.708	10.252	15.555	1.376
河南汲县柳园坡	潮褐土	花生	成熟期	0.068	0.404	0.286	0.286	15.681	11.101	1.831	
河南滑县城	潮褐土	玉米	成熟期	0.045	0.047	0.145	0.212	2.831	2.727	18.444	0.878
河南滑县城	潮褐土	棉花	成熟期	0.165	0.143	0.124	0.325	5.957	6.388	20.550	2.949
河南南乐县城关	潮褐土	玉米	成熟期	0.049	0.062	0.147	0.231	3.734	2.663	20.097	0.956
河南南乐县城关	潮褐土	谷子	成熟期	0.094	0.077	0.217	0.217	23.965	71.816	5.847	
河南南乐县城关	潮褐土	玉米	成熟期	0.060	0.074	0.199	0.234	4.457	3.605	20.358	1.171
山东馆陶县	棕壤 ¹⁰	大豆	成熟期	0.084	0.091	0.147	0.428	0.756	1.374	4.08	0.185
山东聊城城市	棕壤	玉米	成熟期	0.060	0.084	0.243	0.270	5.060	4.402	23.490	1.171
山东聊城城市	棕壤	棉花	成熟期	0.057	0.056	0.134	0.160	2.333	6.903	10.117	1.019
山东临清县	棕壤	谷子	成熟期	0.024	0.069	0.199	0.199	21.475	65.859	1.493	
河北南宫市	盐潮土	棉花	成熟期	0.089	0.080	0.105	0.168	3.333	5.409	1.062	1.591
河北南宫市	盐潮土	高粱	成熟期	0.062	0.035	0.157	0.019	1.400	2.147	0.851	1.692
河北衡水市	盐潮土	玉米	成熟期	0.078	0.048	0.215	0.348	2.891	0.867	30.276	1.522
河北衡水市	盐潮土	大豆	成熟期	0.048	0.077	0.068	0.368	0.640	0.608	5.365	0.106
河北衡水市	盐潮土	棉花	成熟期	0.102	0.167	0.172	0.254	6.957	8.861	16.060	1.823

山东平原县李家桥	潮土	玉米	成熟期	0.099	0.074	0.131	0.255	4.457	2.373	22.185	1.932
山东禹城县官家闸	潮土	玉米	成熟期	0.078	0.025	0.085	0.176	1.540	1.506	15.312	1.522
山东禹城县官家闸	潮土	棉花	成熟期	0.102	0.122	0.145	0.160	5.082	7.470	10.117	2.145
山东滨县二十里铺	盐土	大豆	成熟期	0.091	0.072	0.185	0.100	0.598	1.654	1.458	0.201
山东滨县二十里铺	盐土	玉米	成熟期	0.078	0.071	0.120	0.273	4.276	2.174	23.751	1.522
山东庆云县	盐土	棉花	成熟期	0.065	0.073	0.260	0.199	3.041	13.394	12.583	1.162
山东庆云县	盐土	玉米	成熟期	0.077	0.440	0.215	0.206	6.503	3.895	17.922	1.503
河北沧州市	盐潮土	白薯	成熟期	0.195	0.152	—	—	10.827	—	—	12.305
河北沧州市	盐潮土	谷子	成熟期	0.093	0.117	0.262	—	36.414	80.709	—	5.785

1. Cinnamon soils 2. Loessal fluvo-aquic soils 3. Salinized bog soils 4. Fluvo-aquic cinnamon soils 5. Salinized loessal fluvo-aquic soils 6. Coastal solonchaks 7. Solonchaks 8. Salinized meadow soils 9. Mountain brown earth 10. Brown earth 11. *Zea mays* 12. *Oryza sativa* 13. *Glycine max* 14. *Sorghum vulgare* 15. *Solanum tuberosum* 16. *Helianthus annuus* 17. *Triticum aestivum* 18. *Panicum mitis-aceum* 19. *Brassica juncea* 20. *Avena nuda* 21. *Arachis hypogaea* 22. *Ipomoea batatas* 23. *Gossypium hirsutum* 24. *Sesamum indicum* 25. Mature period 26. Vegetative period 27. Florescence

稻和小麦的输出量较低,为 $5-6\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (表2)。虽然表2显示的数据以向日葵和莜麦为最低,但因采样时果实不成熟或未长出(表1),没能将果实部分统计在内,使数据偏低;输入量(因对枯落物未做分解速率实验,这部分输入量忽略,以根系代表)以白薯为最大,达 $12.557\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;其次为谷子和花生,其余均较低为 $<2\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;白薯可食部分块根与其他根系未区分开来,至使数据偏高,实际上这部分也以输出量的形式带走了。以上说明这些作物都是以高输出和低输入来消耗土壤库中的磷,造成土壤库中的磷因收获作物而使收支严重不平衡,这种不平衡可从输出量:输入量比率得到证实,如玉米和谷子的比率分别为23:1,大豆和马铃薯为19:1以及棉花为15:1等(表2)。

表2 海河流域14种农作物含磷量及输入、输出量

Table 2 The contents, inputs and outputs of phosphorus of 14 crops in the Haihe River Basin

植物种类 Species	样品数 Sample numbers	磷含量 P content	输出量 Output 输入量 Input ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	输出量: 输入量 Output: Input	
玉米 ¹¹	32	0.140% ± 0.062	32.661 ± 8.929	1.405 ± 0.947	23 : 1
高粱 ¹⁴	10	0.121% ± 0.080	13.442 ± 8.758	1.637 ± 0.715	8 : 1
谷子 ¹⁴	8	0.093% ± 0.055	99.758 ± 56.937	4.292 ± 2.131	23 : 1
棉花 ²³	10	0.146% ± 0.056	26.591 ± 8.047	1.805 ± 0.075	15 : 1
大豆 ¹³	15	0.174% ± 0.077	6.584 ± 3.543	0.353 ± 0.088	19 : 1
水稻 ¹²	3	0.023% ± 0.088	3.850 ± 1.150	1.230 ± 0.155	5 : 1
小麦 ¹⁷	2	0.095% ± 0.056	5.413 ± 2.785	0.730 ± 0.089	7 : 1
白薯 ²²	3	0.175% ± 0.052	10.685 ± 3.695	12.557 ± 5.020	0.9 : 1
花生 ²¹	2	0.209% ± 0.061	10.751 ± 7.493	2.451 ± 0.857	4 : 1
向日葵 ¹⁶	2	0.074% ± 0.021	0.261 ± 0.339	0.205 ± 0.011	1 : 1
马铃薯 ¹⁵	3	0.214% ± 0.065	7.580 ± 2.141	0.393 ± 0.021	19 : 1
芝麻 ²⁴	1	0.163%	9.346	1.577	6 : 1
莜麦 ²⁰	1	0.089%	0.489	0.258	2 : 1
油菜 ¹⁹	1	0.086	1.525	0.141	11 : 1

See species names at the bottom of table 1

2.2 不同部位磷的输出量和输入量

果实磷的输出量以谷子为最大,达 $68.841\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (图1,数据未在图1中列出),其次是玉米和棉花,分别为23.929和 $14.136\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;茎的输出量玉米最高,为 $5.358\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$;叶以棉花最高,为 $9.010\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。白薯的输入量(含块根)最高,达 $13.670\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

参考有关资料(M. J. 福里赛尔, 1981),将输出(入)量 $<1, 1-5, 5-10, >10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 作为极低、低、中、高输出(入)量类型,则具高磷输出量的器官部位有玉米、谷子、花生、棉花果实,谷子、花生、白薯茎叶等;具中等输出量的有玉米、芝麻茎,高粱果实,马铃薯、棉花叶等;具很低输出量的有水稻、小麦果实,莜麦茎叶,向日葵茎、叶等。就磷的输入量而言,除白薯为高和谷子为低输入类型外,其余均属极低输入类型。

2.3 不同子流域玉米对磷的输出量和输入量

图2揭示了海河流域不同子流域玉米对磷的输出、输入量,可以看出输出量从大到小依次为大清河流域>潮白河流域>漳卫河流域>滹沱河流域>永定河流域;输入量:漳卫

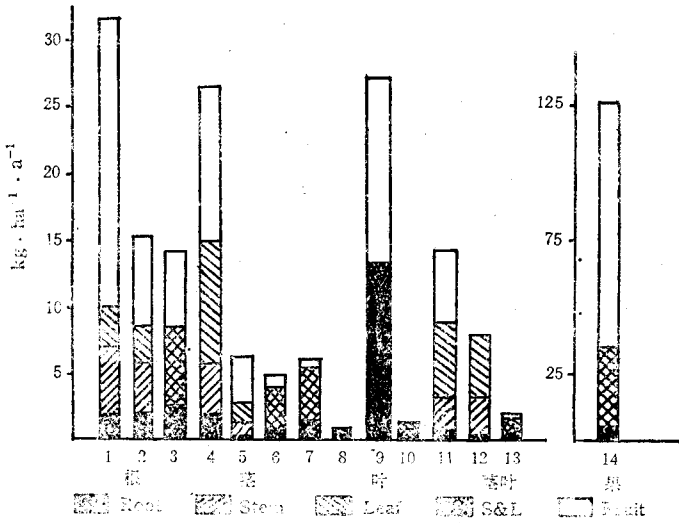


图1 14种农作物的输入量(根)和输出量(茎、叶、茎叶、果)

Fig. 1 The input (root) and output (stem, leaf, fruit, stem and leaf) of phosphorus by 14 crops

1.玉米¹¹, 2.高粱¹⁴, 3.花生²¹, 4.棉花²³, 5.大豆¹³, 6.水稻¹², 7.小麦¹¹, 8.向日葵¹⁴, 9.白薯²², 10.苜蓿²⁴, 11.芝麻²⁴, 12.马铃薯¹⁵, 13.油菜¹¹, 14.谷子¹¹

(See species names at the bottom of Table 1)

河流域> 滹沱河流域> 永定河流域> 大清河流域> 潮白河流域。不同子流域输出(入)量的差异,一是与玉米产量有关,二是与不同子流域玉米含磷量有关,但在5个子流域中,玉米的含磷量分别为: 滹沱河流域 0.085%; 永定河流域 0.074%; 漳卫河流域 0.064%; 潮白河流域 0.062%; 大清河流域 0.054%,与玉米输入、输出量的变化规律不一致,可见大清河和潮白河流域较高的输出量主要不是由于玉米体内的含量引起的,而与这两个流域较高的玉米收获量有关,从而表明,这两个流域农业活动频繁,造成磷的损失也越严重,对化肥的依赖性就越强。虽然不同子流域输入量有一定的差异,但与输出量相比,还是输出远大于输入。

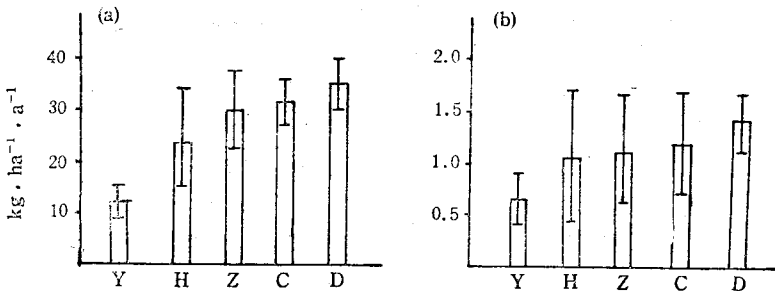


图2 海河流域不同子流域玉米对土壤磷的输出量(a)和输入量(b)比较

Fig.2 The output (a) and input (b) of phosphorus by *Zea mays* at the different subsidiary area of the Haihe River Basin

Y: 永定河流域 Yongdin River Basin H: 滹沱河流域 Haotuo River Basin
 Z: 漳卫河流域 Zhangwei River Basin C: 潮白河流域 Chaobai River Valley
 D: 大清河流域 Daqing River Basin

2.4 以作物输出造成农田生态系统磷损失的速率

为了预报农田生态系统磷损失的速率,我们实测了海河流域 21 个土壤样品含磷量,平均值为 $0.42 \pm 0.21 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,由此估计¹⁾出海河流域磷库存量约为 $470-1420 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。由此可以估算,若种植谷子(每年输出磷 $99.758 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,输入磷 $4.292 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,净减少 $95.466 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;种子对磷输入的这部分量很小,因而忽略不计),则土壤磷因收获而损失殆尽所花的时间约为 5—15 年,依次类推,玉米为 40—60 年,大豆为 80—230 年,棉花为 20—60 年,高粱为 40—120 年等(表 3)。海河流域已有数千年的耕作历史,且土壤中有效磷只占全磷量的一小部分(如山西省土壤有效磷约占全磷的 0.04% (赵建强等, 1990)。可见,土壤经常处于缺磷状态,仅靠施肥来维持。

表 3 种植和收获不同农作物需磷量、磷减少量、磷损失殆尽时间和适宜施肥量估算

Table 3 The requirements and losses of phosphorus, and time needed to deplete all its phosphorus deposit and the amount of fertilizer needs to be applied to balance the losses for different crops at the Haihe River Basin

植物种类 Species	需磷量 Requirements ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	减少量 Losses ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	损失殆尽时间(年) (Year) Depletion time	适宜施肥量 fertilizers ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) to be applied
玉米 ¹¹	34,066	31,256	20—40	38—51
高粱 ¹⁴	15,079	11,805	40—120	17—23
谷子 ¹⁸	104,050	95,466	5—15	114—156
棉花 ²³	28,396	24,286	20—60	31—42
大豆 ¹⁸	6,937	6,231	80—230	8—11
水稻 ¹²	4,580	3,120	160—470	5—7
小麦 ¹⁷	6,143	4,583	100—310	7—9
白薯 ²²	23,242	-1,872	—	25—35
花生 ²¹	13,202	8,300	60—180	14—20
向日葵 ¹⁶	0,466	0,056	8000—16000	0.5—0.8
马铃薯 ¹⁵	7,973	7,187	70—200	9—12
芝麻 ²⁴	10,923	7,769	60—180	11—15
莜麦 ²⁰	0,747	0,231	2000—7100	0.9—1.1
油菜 ¹⁹	1,666	1,384	360—1020	2.0—3.0

See species names at the bottom of table 1

解决土壤缺磷的途径有两条:一是追施磷肥,注意施肥方法,提高磷肥的有效性,二是秸秆还田。施肥增产效果是明显的,但由于一些活性磷酸盐易变成无效,施肥用量应该比作物吸收的量高 10—50% (K. 蒙格尔等, 1987),由此可以计算出种植谷子应施磷肥 $114-156 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,玉米 $38-51 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,棉花 $31-43 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,大豆 $8-10 \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 等(表 3)。这样既能基本满足作物正常需要,又不致于造成浪费。秸秆还田不但能使其其中吸收的 N、P、K 等无机矿物通过分解作用返回土壤,而且还能提高土壤有机质含量和改良土壤结构。增施化肥虽能暂时解决作物对矿物的需要,但投资高,易造成浪

1) 计算公式为: $P_{\text{土壤}} (\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = \frac{\text{土壤P的ppm数} \times 0.3 \times 0.5}{1/15}$, ppm 数为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 数 $\times 1000$, 以耕作层 30cm

费和土壤污染等。应大力提倡秸秆还田,促使农田生态系统矿物质良性循环。

3 结果与讨论

1. 海河流域 14 种农作物磷的输出量以谷子为最大,其次为玉米和棉花;输入量以白薯为最大。输入量比输出量少的多,约低 10 倍左右,最高可达 22 倍。不同部位中,玉米、谷子、花生、棉花等作物的输出量以果实为最高,谷子、花生、白薯等以茎叶为高输出类型(图 1),这些特点说明了土壤库中的磷极其易以收获的形式被带走。输入量除白薯为高输入量外,其余均为低或很低类型,但其高输入量是因将块根中的磷也计算在内了,实际这部分也以输出的形式被带走了。

2. 不同作物输出(入)量的差异主要不是与作物的含磷量有关,而是与收获的干物质相关。在 5 个子流域中,大清河流域和潮白河流域玉米较高的磷输出量,说明这两个流域农业集约化程度高,产量高,对化肥的依赖性也强。而根的输入量之间虽有差异但不很明显,且与输出量相比仍是入不敷出(图 2)。

3. 谷子、玉米、白薯、高粱、棉花、花生等作物对土壤有效磷的年需求量(图 1)超出土壤耕作层(30cm)有效磷库存量范围的低值或超出该范围(以耕作层全磷库存量 470—1420kg·ha⁻¹计,则有效磷含量(赵建强等,1990)约为 18.8—56.8kg·ha⁻¹),而海河流域已有数千年的耕作历史,从而说明受农业的影响,土壤库中的有效磷如不施肥补充可能早就损失殆尽了。由于作物的强烈吸收和输出,即使全部磷库存量,也会在很短的时间内转移掉,如种植谷子使土壤全磷损失殆尽的时间约 5—15 年,玉米 20—40 年,大豆 80—230 年,棉花 20—60 年,高粱 40—120 年(表 3)。当然枯落物和根系会使部分磷归还土壤,但与输出的部分比较,这部分数量少得多。

当然这些数据是不确切的估测值,因为无法对土壤库存量做到精确的估计,实际上磷损失殆尽的时间可能更长或更短。但与同一地区其他研究比较(京津渤地区污染规律和环境质量研究综合组,1989),我们的实测值和估计值还是较客观的。况且精确的估计值意义也不大,关键是寻找农田生态系统磷循环规律和采取相应的措施。

4. 整个采样季节从 7 月到 10 月,有些样品是在收获前采的,所得植物的含磷量或输出(入)量可能比实际水平偏低,因而本文有些估计可能也偏低。例如水稻磷的输出量和输入量,我国南方¹⁾为 5.929 和 1.213kg·ha⁻¹·a⁻¹,本文为 3.850 和 0.735kg·ha⁻¹·a⁻¹,但输出:输入量比率均为 5:1,可见规律性仍是很明显的。对根系部分的估计,因为很难收获全部须根和不定根,故所获根的干物质量就不可能与实际情况完全一致,因而对施肥量的估计,也可能偏低。另外一个重要的因素也应考虑,这就是海河流域农作物尤其是禾本科作物磷营养水平低于正常需要量(蒋高明等,1993),所估计的施肥量也会偏低,在实践中可适当提高施肥量。本文试从植物元素化学特征和元素循环的角度考虑施肥量,可作为农业经营者制定施肥方案的依据。

5. 对整个流域中磷的输入量因限于条件,没有把枯落物分解归还的磷考虑在内,另外对大气通过降水的形式输入的量也未做分析,今后应包括枯落物分解释放磷和降水中的磷做更深入的研究。

1) 南京大学、中山大学等编,土壤学基础与土壤地理学,高等教育出版社,123 页。

参 考 文 献

- 李鼎新、赵更生, 1992: 黄土高原地区土壤中磷的状态和磷肥投放方案建议, 水土保持学报, 6(1)74—79。
- 京津渤地区污染规律和环境质量研究综合组, 1989: 京津渤地区环境演化开发与保护途径, 科学出版社, 110—112。
- 赵建强、万淑贞、李中平, 1990: 山西主要土壤磷素动态及有效性, 土壤通报, 20(3)211—214。
- 蒋高明、黄银晓、林舜华、韩荣庄、高雷明, 1993: 海河流域不同植物磷含量、地域分异及其输入、输出量研究, 环境科学, 13(2)244—249。
- K. 蒙格尔, E. A. 克尔克贝著(张宜春、刘同仇等译), 1987: 植物营养原理, 农业出版社, 400—422。
- M. J. 福里赛尔(夏荣基等译), 1981: 农业生态系统中矿质养分的循环, 农业出版社, 10—25。
- Baker, J. L., K. L. Campbell, H. P. Johnson & J. J. Hanway, 1975: Nitrate, phosphorus and sulfate in subsurface drainage water, Journal of Environmental Quality, 4(1)406—412。
- Crisp, D. T., 1966: Input and Output of mineral from an area of Pennine moorland, Journal of Applied Ecology, 3(2)327—348。
- Hanway, J. J. & J. M., Laflen, 1974: Plant nutrient losses from till-outlet terraces, Journal of Environmental Quality, 3(3)351—356。
- Hanway, D. S., 1975: Phosphorus cycling by soil micro-organisms and plant roots, in N. Walker (Ed.), Soil Microbiology. Butterworths, London, Chapter 4。

A PRIMARY STUDY ON THE OUTPUT AND INPUT OF PHOSPHORUS IN 14 CROP FIELDS IN THE HAIHE RIVER BASIN, NORTH CHINA

Jiang Gao-ming, Huang Yin-xiao, Lin Shun-hua Gao Lei-ming
(Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044)

Abstract

1. The average concentration of P in the tissues of the 14 crops of the Haihe River Basin was 0.127%, varying from 0.023% to 0.214%. The highest P concentration in different organs of the 14 crops was 0.419%, while the lowest was 0.019%.

2. Of the 14 crops in the Haihe River Basin, *Panicum miliaceum* had the highest P output (removal in the harvested parts) from the soil pool, being $99.758 \pm 56.935 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, followed by *Zea mays* and *Gossypium hirsutum*. *Ipomoea batatas* could be considered to be the greatest P contributor to the soil pool (the returning rate averaging $12.557 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, but including the edible parts), followed by *Zea mays* and *Arachis hypogaea*. Most of the other crops contributed a very small amount of P to the soil, generally less than $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

3. The fruits of *Zea mays*, *Panicum miliaceum*, *Arachis hypogaea*, *Gossypium hirsutum* and some others, and the stems or stems plus leaves of *Zea mays*, *Arachis hypogaea* and *Ipomoea batatas* and so on were the main P output carriers. The low P input rates of most crops grown in the Haihe River Basin suggested that a large amount of P was removed with the harvested parts.

4. The P outputs in the corn fields of different subsidiary river basins of

the Haihe River Basin were different, in the order. Daqing River Basin > Chaobai River Basin > Zhangwei River Basin > Haotuo River Basin > Yongding River Basin.

5. Our results show that the P removal by harvested crop parts was 22 times of the P returned, suggesting that if the straw was not returned, growing *Panicum miliaceum*, *Zea mays* and *Gossypium hirsutum* would result in P losses of 99.758, 32.661 and 26.591 kg·ha⁻¹·a⁻¹, respectively. To maintain the soil fertility, P fertilization or returning straw to the field are recommended. The farmers, however, have only paid attention to P fertilization, but have ignored the straw-returning method that is considered to be a very effective way to recycle not only P, but also other essential elements as well.

Key words Phosphorus, Nutrient cycling, Agricultural crops. Haihe