

海河流域土壤中磷的库存量与通量研究*

刘全友 孙建中 黄银晓*[√] 杨文襄

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)
* (中国科学院植物研究所, 北京, 100044)

5154.1

A

摘要 本文通过对海河流域土壤中磷及其形态含量的分析结果, 计算出该流域土壤中磷的库存量为 6.42×10^{10} kg。并以成土母质、人畜粪、化肥施入量和径流带入量、大气降尘及植物的残留量等因素为对土壤中磷的贡献; 同时以径流的带出, 大气的飘尘及植物体茎叶等因素为磷的迁出部分, 计算出海河流域土壤中磷的进出量分别为 4.24×10^8 kg/a 和 3.66×10^8 kg/a, 以此来研究其通量关系。

关键词: 磷, 土壤, 库存量, 流通量, 生态学

地球上磷的分布主要集中在岩石圈(包括土壤)。陆地上主要分布于土壤中。土壤既是各种天然来源磷及人为来源磷的富集场所, 也是磷的流通与转换中的主要介质, 而它们各个介质间的流通又有十分复杂的关系。本文主要研究海河流域土壤中磷及其形态的库存量, 以及土壤与水体、大气及植物间的流通量。

1 土壤中磷的库存量

土壤是磷的主要库之一。磷是地壳中含量比较丰富的元素, 其丰度为 $1050 \mu\text{g/g}$, 土壤中磷的含量及其形态因土壤质地、物理化学条件等不同而有较大的变化, 施肥以及有机质多寡影响着各种形态磷的转化。现将所测本区土壤中磷的含量列于表1(样品来源^[1]略)。

分析方法: 水溶性磷采用钼锑抗比色法; 有机磷采用灼烧- H_2SO_4 浸提取法; 固定磷采用酸溶-钼锑抗比色法。

表1 海河流域不同土壤类型中磷的含量
Table 1 Content of phosphorus in the soil classes of Haihe River basin ($\mu\text{g/g}$)

元素 Elements	样品数 Number of samples	褐土 Cinnamon soil	样品数 Number of samples	潮土 Fluvo-aquic soil	样品数 Number of samples	盐化潮土 Solenchak-chao soil	平均值 Average value
水溶性磷 Solution P	50	1.62	62	1.80	16	2.16	1.85
有机磷 Organic P	50	25.07	62	33.81	16	38.36	32.27
固定磷 Fixed P	50	510.75	62	522.35	16	540.35	524.5
全磷 Total P	50	537.70	62	557.95	16	580.45	558.6
有机质(%) Organic matter	50	0.64	62	0.69	16	0.82	0.69

* 中国科学院“七·五”重大基金资助项目。
本文于1992年10月14日收到, 修改稿于1993年2月20日收到。

从表 1 可见,海河流域土壤中各形态磷在不同土壤及同一土壤不同层次中^[2],其含量也不相同。该区主要表现为由褐土—潮土—盐化潮土磷含量逐渐升高的趋势。

磷的含量受表生地球化学作用的影响。从水平分布上看,太行山以西海拔较高的地区,广泛分布着花岗岩及石灰性岩类母质,土壤质地较粗,磷的含量较低,普遍低于均值。中部为大面积冲积、洪积平原,潮土类的熟化程度较高,质地为壤性,对磷的富集起着一定作用。而海拔较低的盐化潮土,有机质含磷量增加,磷的累积也较多,因此,该区磷的含量表现出随土壤类型变化而呈由西向东逐渐增加的趋势。

从纵向看,表层(0—20cm)磷的含量普遍高于下层(20—40cm),这主要是耕作肥的结果。但在淋溶作用较强的土壤中表层磷含量略低于下层。

1.1 土壤溶液中的磷 土壤溶液中的磷数量很少,一般只有 0.1—1 $\mu\text{g/g}$,最少的甚至只有 1 $\mu\text{g/g}$ 。矿物态磷的溶解度很低,但它是速效部分,是可供植物利用的主要形态。当然,溶液中磷的浓度不足以满足植物的需要,土壤的有效磷还依赖于母体部分的不断补充,包括磷酸盐矿物的溶解和被吸附磷的释放。

本区所测土壤中磷的上层平均值为 2.22 $\mu\text{g/g}$,下层为 1.5 $\mu\text{g/g}$,含量范围为 0.2—7.6 $\mu\text{g/g}$,平均值为 1.85 $\mu\text{g/g}$,根据这一值,取本流域面积为 256869 km^2 ,计算出 30cm 厚土层(耕作层)中土壤溶液磷为 3.10 $\times 10^6\text{kg}$ 。

1.2 有机态磷 本区有机磷的含量范围在 16.2—73.9 $\mu\text{g/g}$,上层平均值为 35.59 $\mu\text{g/g}$,下层平均值为 28.95 $\mu\text{g/g}$,均值为 32.27 $\mu\text{g/g}$ 。全区 64 个样点的分布特点是:低含量点较多,低于中值的点占全区的 58%,尤其是极低值(<15 $\mu\text{g/g}$)的为最多,占全区的 38%,高值(>60 $\mu\text{g/g}$)的点仅占全区的 20%,可见该区有机磷含量是偏低的。

全区微生物测量的统计数字中,盐化潮土细菌平均数为 13.3 $\times 10^5$ 个/g 土,并且土壤中细菌数有由西向东增高的趋势。本区有机磷总量为 3.98 $\times 10^6\text{kg}$ 。

1.3 固定态磷 在各形态磷中固定态磷占全磷相当大比例。本区磷的情况也一样,其含量范围为 113.9—888.0 $\mu\text{g/g}$,上层平均值为 556.2 $\mu\text{g/g}$,下层均值为 492.7 $\mu\text{g/g}$,均值为 524.5 $\mu\text{g/g}$ (占全磷的 94%)。该区固定态磷的库存量为 5.99 $\times 10^{10}\text{kg}$,全磷的库存量为 6.42 $\times 10^{10}\text{kg}$ 。

2 土壤中磷的通量

磷在环境介质中进行着各种复杂的通量循环。现以土体为中心,计算出主要介质中磷的通量。

2.1 母质对土壤中磷的贡献 土壤中磷的主要来源最初是火成岩,其含量虽然并不高,但其中含有独立矿物——磷灰石。其 P_2O_5 的含量为 41%—42.5% 对比岩浆岩中磷的含量。在不同岩石中其含磷量变化也较大,并随岩石酸性程度的增加而下降。玄武岩中磷的含量最高,中性岩中磷的含量相对均匀,酸性岩中磷的含量低且均匀^[3]。本流域广泛分布着花岗岩类以及石灰性岩类母质,因此取地壳丰度 1050 $\mu\text{g/g}$ 、母质厚度 30cm、比重 2.0 t/m^3 、面积 25689 km^2 ,得出该流域母质对土壤中磷的贡献为 1.12 $\times 10^{11}\text{kg}$ 。

2.2 人畜粪尿对土壤中磷的贡献 土壤中磷及其各形态的含量因土壤质地、物理化学条件等不同而有较大差异,人为施入有机肥及有机质多寡与土壤含磷量,有很大关系。如该区的河北省曲周县的潮土,固定态磷含量高达 1234 $\mu\text{g/g}$,主要是由于施入人粪尿等有机肥,形成了磷的累积。本区以 8.2718 $\times 10^7$ 人计,按每人每年排粪 18.45 kg ,排尿 26.60 kg ,全区每年共排粪尿

$3.40 \times 10^8 \text{kg}$, 粪尿残留量 $3.75 \times 10^7 \text{kg}$, 流失量 $3.03 \times 10^8 \text{kg}$, 粪尿含磷量为 $3.88 \times 10^8 \text{kg}$, 其中磷残留量为 $1.48 \times 10^8 \text{kg}$, 损失量为 $2.40 \times 10^8 \text{kg}$ (4)。

本区牲畜及禽类以 3.232583×10^6 头(只)计*。排粪量为 2664kg/Ind. a (累计)所含养分以 P_2O_5 算, 并以鲜肥经熟化过程肥流失率(粪尿均值)为 61.8% (4), 所得全区牲畜、禽类肥料中磷为 $8.85 \times 10^7 \text{kg}$, 残留量为 $3.38 \times 10^7 \text{kg}$, 流失量为 $5.47 \times 10^7 \text{kg}$ (表 2)。

表 2 海河流域牲畜排粪含磷量

Table 2 The content of phosphorus in the excretion of livestock in the Haihe River basin

类别 Kind	头数 ($\times 10^4$) Number	排粪量 (kg/头·a) Amount of excrement (kg/head·a)	每年施肥 (kg) Annual appling of manure	折合磷 (kg/a) Amount of manure converted into phosphorus
牛 Cattle	227.98	9000	2.05×10^{10}	1.70×10^7
马 Horse	81.42	5000	4.07×10^9	2.80×10^6
驴 Ass	707.2	4000	8.29×10^9	5.07×10^6
骡 Mule	105.03	3000	3.15×10^9	2.94×10^6
猪 Pig	1898.6	2200	4.18×10^{10}	4.75×10^7
羊 Sheep	166.6	750	1.25×10^9	1.48×10^6
鸡 Chicken	23300	5	1.17×10^9	7.87×10^6
鸭 Duck	6211	10	6.21×10^8	3.88×10^4
鹅 Goose	128	14	1.79×10^7	3.90×10^4
合计 Total				8.85×10^7

尿粪混合挥发系数 Volatilization of excrement and urine 61.8% , 残存量 Remains $3.38 \times 10^7 \text{kg}$, 挥发量 Amount Volatilization $5.47 \times 10^7 \text{kg}$.

2.3 化肥对土壤中磷的贡献

土壤中磷的另一个来源是化肥。我国化肥磷从 1954 年施用, 自 1955 年开始生产, 1954 年仅施用 1000t , 进入 70 年代就达 150 多万 t , 1988 年全国化肥磷达到 300 多万吨。但由于我国施用磷肥的历史较短, 施用量又不大, 因此, 大部分都是缺磷地区。按 1988 年统计数字, 本区化肥施用量为 $6.89 \times 10^8 \text{kg}$ 磷肥(过磷酸钙)进行计算, 结果每年化肥向本区输入总磷量为 $2.25 \times 10^8 \text{kg}$, 化肥向空间损失总磷量为 $4.11 \times 10^7 \text{kg}$ (表 3)。

表 3 海河流域化肥施用磷

Table 3 The content of phosphorus in the chemical fertilizer applied in the Haihe River basin

化肥施用量 (kg/a) Appling of chemical fertilizer	折纯 (kg) Net amount of chemical fertilizer	每年折纯 (g/m ²) Annual net amount of fertilizer	化肥挥发量 (kg) Volatilized amount of phosphorus in chemical fertilizer	化肥残留量 (kg) The remains of chemical fertilizer	磷挥发量 (kg) Total volatilized amount of phosphorus	磷残留量 (kg) The remains of phosphorus
6.89×10^8	1.55×10^9	8.38	2.40×10^8	1.30×10^8	4.11×10^7	2.25×10^8

2.4 径流对土壤中磷的交换影响 土壤体系中元素交换途径之一是通过径流的携带。它与植被、大气等有着密切联系, 但这些都是难以测定的。以各水系年径流量 $2.09 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{a}$, 各子流域磷含量(均值), 得到径流携带土壤中含磷量为 $1.19 \times 10^8 \text{kg}$ (表 4)。

以各水系地下水径流 $97.45 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 及太行山源头水含磷量, 得到每年通过地下水补给

* 数据取自统计处鉴(1988)。

土壤总磷量为 $1.63 \times 10^5 \text{kg}$ (见表 5)。

表 4 海河流和域径流输出磷量 *
Table 4 The capacity of runoff and discharge in the Haihe River basin

子流域 Basin	北运河 Noth canal	永定河 Yongding river	大清河 Daqing river	子牙河 Ziya river	黑龙江东河 Heilonggang river	漳卫南运河 Zhang-wei canal	海河干流 A tributary of the Haihe river	徒骇马颊河 Tuhaimajia river
径流量 ($\times 10^9 \text{m}^3/\text{a}$) Runoff	41.61	20.29	41.70	40.41	9.21	38.81	1.57	15.24
含量* ($\mu\text{g}/\text{ml}$) PContent	0.0573							
径流输出量 (kg/a) Runoff discharge	1.19×10^8							

*“海河流域水资源保护规划纲要”讨论稿,水利部海河委员会,1989。 ** 均值 Average Value。

表 5 海河流域地下水和磷的库存量 *
Table 5 The storage capacity of underground water in the Haihe River basin

流域 Basin	河川基流 Bed flow	山前侧渗 Leakage	河床潜流 Underflow	山前泉水 Spring	开采消耗 Miningconsume	磷含量 (kg/ml) The centent of phorphous	地下水径流量 磷库存量 (kg) P storage capacity
	径流 $\times 10^6 \text{m}^3$						
海河北系 Northpart of Haihe river basin	20.8	9.2		0.30	1.76		
海河南系 Southpart of Haihe river basin	53.14	11.27	1.57	1.17	1.76		
全流域 Whole basin	73.32	20.47	1.57	1.47	3.53		
总计 Total	97.45					0.057	1.63×10^5

*“海河流域水资源保护规划纲要”讨论稿,水利部海河委员会,1989。

2.5 飘尘降尘对土壤磷的影响 煤炭的燃烧、工业排放以及沙尘暴等物理现象都将会给土壤带来元素的迁移及重新分布。由于燃烧种类多,排放途径复杂,传输方式不一和尘物起降范围不易确定等因素,使测定有一定的困难。针对海河流域的大同、北京、天津等大城市用煤较多的特点,在不同海拔高度沿主风向由西北向东南选 3 个定位点,并增加北京近郊的廊坊点,力求分别代表本流域的西部山区,中部平原和近海平原。

2.5.1 飘尘输入的磷量 气体飘尘干沉降量的测定过程与地表特征、植物种类、沉降物组成、颗粒物大小和微气象变化等都有关系。Chambeelain 定义干沉降速率为沉降通量除以大气中某种气体或颗粒物浓度,其表达式如下:

$$-F = V_d \cdot C$$

式中: $-F$ 为尘降通量; V_d 为沉降速度; C 为飘尘浓度。

已知 V_d 和 C , (参考高度为高出陆地面 1—1.5m), 得到每年通过飘尘向本区输入量为 $9.20 \times 10^4 \text{kg}/\text{a}$ (表 6)。

表 6 海河流域飘尘输入磷量
Table 6 The content of phosphorus of input float dust in the Haihe river basin

沉降速度 V_d Deposition velocity (cm/a)	通量 Flux($g/m^2 \cdot a$) *				不同覆盖面所占全流域面积的百分比 Percentage of different cover in whole basin area
	廊坊 Langfang	南皮 Nanpi	定州 Dingzhou	忻州 Xinzhou	
0.005	0.000591	0.000047	0.000047	0.0012	34.8(叶面, 89393km ²) Blade
1	0.1819	0.00933	0.00933	0.2550	25.8(草地, 6625km ²) Grass
7	0.8273	0.06531	0.06531	1.7851	39.4(田地, 100851km ²) Field
输入 P 量(kg/a) P amount of input	9.20 × 10 ⁴				

* 飘尘中含磷浓度: 廊坊 0.38 μ g/m³, 南皮 0.03 μ g/m³, 定州 0.03 μ g/m³, 忻州 0.82 μ g/m³。

2.5.2 干沉降输入磷量的估算 根据 1988、1989 年测得定州和忻州降尘中磷元素含量, 得到由降尘向本区输入磷量为 3.34 × 10⁷kg/a(见表 7)。

表 7 海河流域降尘输入磷量
Table 7 The content of phosphorus of input fall dust in the Haihe river basin

地点 Place	定州 Dingzhou (1988)	忻州 Xinzhou (1988)	定州 Dingzhou (1989)	忻州 Xinzhou (1989)	总面积(km ²) Total area	P 的输入量(kg/a) P input amount in dropped dust
P 含量 P Content (t/km ² a)	0.22	0.04	0.16	0.11	256869	3.34 × 10 ⁷

2.5.3 湿沉降输入的磷量 降雨是从大气向土壤输入元素的重要途径, 本文于 1988 与 1989 年的 6—9 月份在忻州、定州雨季采集雨样, 测定磷的输入量, 如忻州点按平均值降雨量为 433.6mm, 雨水组分中 PO₄³⁻ 浓度为 0.165mg/l, 则湿沉降磷量为 0.0234g/m² · a。定州点年均降雨量为 516.0mm, 雨水组分 PO₄³⁻ 浓度为 0.314mg/l, 则湿沉降磷量为 0.053g/m² · a。本区湿沉降年贡献磷量为 1.36 × 10⁴kg/a。

2.6 植物对土壤中磷的影响 植物对土壤中的磷影响较大。不同种类的植物(包括农作物)对土壤中磷的吸收能力不同, 同时农业活动所带来的养分损失也是不可忽略的。本文着重测定了各种植物根、茎、叶、果中磷含量的残留与迁移量。得到 62 种植物的测定结果(表 8)。

本区植物全磷含量 0.043%—0.298%, 据有关资料报道, 缺磷植物含量约 0.1%, 而不缺磷的禾谷类植物和禾本科牧草的全磷含量可占干物质重的 0.3%—0.4%。各类植物中以蔬菜类含量最高, 如白菜为 0.298%, 经济作物和粮食作物含量也较高, 如花生磷含量为 0.258%, 水稻中为 0.190%, 看出各类作物都具有含磷较高的特点, 以水生植物的浮萍含量最低。以上可见, 本流域大多数植物含磷量均偏低, 植物磷缺现象也较明显。

为了解植物转换磷通量对土壤的影响, 分别测定了植物地上部分茎、叶、果和地下部分根的生物量, 及植物各器官中的磷含量。得到本流域植物携带部分输出磷量为 2.69 × 10⁸kg, 植物残留部分磷量为 1.96 × 10⁷kg。

3 海河流域磷的通量

上述讨论了土壤中磷的库存量及其它主要介质中磷的库存量, 但由于这些库存量的确立

只是从几个主要方面考虑的,况且它的输入量与输出量很难准确地测定,如地表径流既有一部分携带元素输出,又有一部分携带着元素被下渗而残留在土壤里。同样,地下水也有一部分补充到土壤内,又有一部分通过地下潜流而被输出。因此,研究其主要介面间的流通关系就更加复杂。表 9 列出各介质中磷的残留与损失量。

表 8 海河流域植物含磷量(均值)

Table 8 The content of phosphorus in the plants of the Haihe river basin (Average value)

植物类别 Kinds of plants	植物种数 Number of plants	含量 Content (%)	标准差 Normal deviation	植物类别 Kinds of plants	植物种数 Number of plants	含量 Content (%)	标准差 Normal deviation
粮食作物 Grain crops	7	0.148	0.02	常绿阔叶乔木 Evergreen coniferous tree	2	0.098	—
经济作物 Economic crops	7	0.156	0.03	灌木半灌木 Deciduous semishrubs	3	0.103	—
蔬菜作物 Vegetable plants	3	0.194	—	草本植物 Herb	15	0.114	0.060
水果类 Fruit	5	0.12	—	水生植物 Aquatic plants	2	0.047	—
落叶阔叶乔木 Deciduous broadleaf tree	14	0.132	0.01	厥类苔藓植物 Pteridophyte and bryophyte	4	0.175	—

表 9 海河流域磷的库存量与通量(kg)

Table 9 The storage and fluxes of phosphorus in Haihe river basin

通量 Fluxes	土体库存量 Storage of soils	人类尿 Human urine and excrement	牲畜排泄 Content in excrement of livestocks	化肥 Chemical fertilizer	径流携带 磷量 P content in runoff	降尘 Falling dust	植物 Plants	母质贡献 Storage materials
残留量 P remains	6.42×10^{10}	1.48×10^5	3.38×10^7	2.25×10^4	1.63×10^5	3.34×10^7	1.96×10^7	1.12×10^{11}
输出量 P export amount		2.40×10^5	5.47×10^7	4.11×10^7	1.19×10^4	9.20×10^4	2.69×10^8	

即: $1.48 \times 10^5 + 3.38 \times 10^7 + 3.34 \times 10^7 + 9.20 \times 10^4 + 2.25 \times 10^8 + 1.96 \times 10^7 + 1.63 \times 10^5$
 $= 4.24 \times 10^8$

若将,将表 9 中各介质通量中磷的挥发量进行简单地算术叠加,即为对土壤的输出磷量。

即: $2.4 \times 10^5 + 5.47 \times 10^7 + 4.11 \times 10^7 + 2.69 \times 10^8 + 1.19 \times 10^4 = 3.66 \times 10^8 \text{ kg/a}$

如果将各因子视为固定值,各介质的总输入量(按 $4.24 \times 10^8 \text{ kg/a}$ 计未考虑母质的影响)略大于总输出量,即,地球大陆上土壤层的含磷量的通量基本上是恒定的。如果将某一种因子看成是变动的,例如,随着工业的发展,电力工业不断增加,含磷化肥的施入也在不断增加,那么各介质的输入与输出量如大气沉降物参数在变动,但也不足以影响到土壤中磷库存量($6.42 \times 10^{10} \text{ kg}$)的更大变动。

值得注意的是磷的主要来源是成土母质,本文按地壳丰度为 $1050 \mu\text{g/g}$ 值计算,这仅仅是理论值,与本流域实际情况有些差异。因为母质向土壤提供磷源,但需要有一个物理风化及化学变化的成土过程,而北方远不如南方的水热及风化条件,尤其是本区西部山区土壤质地粗,不利于磷的析出和富集²¹。因此,大部分土壤缺磷现象比较明显,同时也表现在各类植物含磷

较低。就该区而言,土壤中磷的含量的流通基本是恒定的,说明地球各介质间的微循环仍保持着良好的生态平衡条件。

参 考 文 献

- [1]刘全友等.海河流域土壤中氮的分布特征.环境科学学报,1992,12(4):489
[2]刘全友等.海河流域土壤中磷的分布特征.环境科学丛刊,1992,13(6):72—77
[3]刘英俊等.元素地球化学.北京:科学出版社,1992,442
[4]中国农业科学院土壤肥料研究所.中国肥料概论.上海:上海科学技术出版社,1962,46,57

STORAGE AND FLUX OF PHOSPHORUS IN SOIL IN THE HAIHE RIVER BASIN

Liu Quanyou Sun Jianzhong Huang Yinxiao* Yang Wenxiang[†]

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

* (Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Beijing 100044)

The amount of phosphorus reserved in soil in the Haihe River basin is estimated at 6.62×10^{10} kg, based on a computation of the analytical results for all the species of phosphorus present in soil. The input of phosphorus is 4.24×10^8 kg/a which was calculated from the contributions of earth-forming parent material, human and animal wastes applied as manure, chemical fertilizers, surface runoff, air dust deposition and plant residues, to the phosphorus in soil. And the output of phosphorus is 3.66×10^8 kg/a which was calculated by the amount of phosphorus transferred by surface runoff and from soil.

Key words: phosphorus, soil, storage, flux.