

闪电河流域6种农作物磷元素含量 动态变化规律研究*

蒋高明 韩荣庄

孙建中

(中国科学院植物研究所,北京 100044)

(中国科学院生态环境研究中心,北京 100083)

摘要 本文报道了闪电河流域15种植物磷含量特征及6种农作物含磷量的动态变化规律,结果表明:闪电河流域植物平均含磷量为 $1.38 \pm 0.62 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最高达 $2.25 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,最低只有 $0.88 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与海河流域及锡林河流域植物磷含量基本一致。6种农作物在整个生长期间的磷含量变化规律表现为三种类型:禾本科植物小麦(*Triticum aestivum*)、莜麦(*Avena nuda*)和油料作物类亚麻(*Linum usitatissimum*),果实成熟期>幼苗期>营养期($P < 0.05$);豆科作物豌豆(*Pisum sativum*)和蚕豆(*Vicia faba*)幼苗期>营养期>果实成熟期($P < 0.001$);块茎类作物马铃薯(*Solanum tuberosum*)则表现为营养期>幼苗期>果实成熟期($P < 0.001$)。6种农作物不同器官部位中根、茎、叶表现为幼苗期>营养期>果实成熟期(马铃薯除外),而果实则为成熟后期>果实形成期。不同器官磷含量比率的变化可反应磷在根、茎、叶、果4个器官的迁移情况,研究认为植物磷在幼苗期及营养期,通过根→茎→叶迁移,而在果实成熟期则通过根→茎→果途径运输。

关键词 植物磷含量;季节变化;磷迁移;农作物;闪电河流域

磷是植物生长必需的大量营养元素之一。自然生态系统中磷的循环属于沉积循环,主要靠水的动力引起磷由陆地向海洋移动,而海洋沉积物再度成为陆地是一个极长的过程。因此,磷的地球化学循环在有限时间内观察是单方向的不完全的循环。在农田生态系统中,随水流失的磷外,由于收获作物每年也会从土壤中带走大量的有效磷(蒋高明等,1993),容易造成土壤缺磷,使作物处于磷饥饿状态,是影响我国耕作区作物增产的主要限制因素。在科学指导施肥方面,土壤学家侧重于研究不同土壤磷的有效性,据此确定适宜的施肥量(于淑芬等,1993;王淑敏等,1993;冯固等,1993)。从生态系统养分循环的角度来看,植物磷元素化学特征也是对土壤磷养分状态有效的指示器。为了弄清农田生态系统磷元素的生物地球化学循环规律,除了研究植物-土壤库中磷贮量及其变化(尹毅等,1993;张小川等,1990;Chapman *et al.*, 1989)外,对于磷在植物内的动态变化规律的研究(Chapman *et al.*, 1989; Dickinson, 1984)也必不可少,它不仅有利于了解作物在不同发育时期对土壤磷的需求,还有利于根据作物吸收磷的特点来科学指导施肥。本文选择河北省涪源县闪电河流域,就6种农作物不同器官磷元素含量的动态规律进行了探讨。

本文于1994年2月收到,1994年4月收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。河北省涪源县计划委员会刘建国同志协助样品采集,田新智同志绘图,特此致谢。

1 材料和方法

1.1 研究地点

位于闪电河流域沽源县境内段。沽源县(E114°50′—116°04′, N41°14′—41°56′)地处河北省最北部,属阴山余脉、内蒙古高原南缘的一部分,海拔1356—2123m。属温带半干旱大陆性季风气候,年均温1.4℃,年雨量426mm,多集中在6—9月份;大风日多,年平均62.3天,平均风速4.6m·s⁻¹;无霜期106天。因此作物耕作制度仅为一年一熟制,主要种植小麦、莜麦、亚麻、豌豆、蚕豆、马铃薯等。6种农作物土壤全磷含量为0.69±0.06 mg·g⁻¹(烘干土,下同),有效磷为0.064±0.048mg·g⁻¹,全氮和全钾含量分别为1.94±0.14和1.36±0.08mg·g⁻¹,有机质含量为3.34%±0.67;土壤呈偏碱性反应,平均pH值为8.06。

1.2 样品采集及分析

采样点设在离县城20km东的闪电河水库附近。于1992年9月采集流域内的主要农作物和天然草本植物样品。于1993年6—9月份(每月2次)重复采集了小麦、莜麦、亚麻、豌豆、蚕豆、马铃薯6种植物的根、茎、叶、果,每次采集平行样品3个。所有样品以自来水冲洗,去除污染物质,凉干去掉水分后放回采样袋中自然风干,带回实验室于60℃下烘12h后粉碎成样。用HCl-HNO₃消化样品,用磷钼蓝比色法测全磷量。

1.3 数据处理

分析数据以FISHMAN统计程序进行显著度检验,以STATGRAPHIC计算机程序绘图。

2 结果与讨论

2.1 闪电河流域不同植物磷含量

15种植物的磷含量见表1。平均含磷量为1.38±0.62mg·g⁻¹(干物质,下同),滨蒿(*Artemisia scoparia*)最高达2.25±0.23mg·g⁻¹,小麦最低,只有0.84±0.21mg·g⁻¹。这一结果与海河流域61种植物(蒋高明等,1993)和锡林河流域122种植物(陈佐忠等,1995)含量基本一致,其含磷量分别为1.29±0.43mg·g⁻¹和1.51±0.65mg·g⁻¹。证明了磷在植物体内为大量元素,在植物体内具有较稳定的含量特点。6种农作物中,磷含量为1.12±0.75mg·g⁻¹,略低于海河流域14种作物的含量(1.28mg·g⁻¹)(蒋高明等,1993)。但豌豆、蚕豆和马铃薯的含量均比海河流域显著高($P<0.001$)。

磷在不同器官中表现出明显的差异(表2),基本表现为果>叶>茎>根。两个流域作物不同器官的磷含量特征基本一致,证实了蒙格尔(1987)指出的种子和谷物含磷量最高,根最低。这种特点极易造成因收获而使土壤有效磷丧失。

2.2 闪电河流域6种农作物含磷量的动态变化

6种农作物的生长期很短,从6月中旬开始至9月中旬结束,约为4个月。在这短暂的季节内,植物体内的磷含量表现出的差异却很明显,其变化特点因不同类型的作物而异。禾本科作物类(图1,A,B)磷含量在果实成熟期(9月)最高,幼苗期(6月底或7月初)次之,而以营养期(7—8月)最低($P<0.05$);豆科作物类,幼苗期>营养期≥果实成熟期($P<0.001$)(图1,D,E);块茎类作物则表现在营养期>幼苗期>果实成熟期($P<0.001$)

表 1 闪电河流域不同植物磷含量及与海河流域植物的比较

Table 1 Comparations of P contents in the different plants in Shandian River Basin with those in Haihe River Basin (mg·g⁻¹ dry matters)

植物名称 Plant species	样本数 n	平均值 Average	变化范围 Range
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	24	0.84±0.21	0.50—1.18
莜麦 <i>Avena nuda</i>	21	0.88±0.39	0.48—1.54
亚麻 <i>Linum usitatissimum</i>	18	1.07±0.38	0.60—1.59
豌豆 <i>Pisum sativum</i>	21	1.67±0.33	1.16—2.18
蚕豆 <i>Vicia faba</i>	15	1.53±0.41	0.98—1.87
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	21	1.98±1.01	0.72—3.77
玉米 <i>Zea mays</i>	6	1.43±0.27	0.60—1.69
青杨 ¹ <i>Populus cathayana</i>	3	1.07±0.37	0.74—1.54
滨蒿 ² <i>Artemisia scoparia</i>	3	2.25±0.23	2.04—2.50
冷蒿 ² <i>A. frigida</i>	3	1.72±0.18	1.65—1.91
寸草苔 <i>Carex duriuscula</i>	3	1.71±0.27	1.41—1.93
委陵菜 ² <i>Potentilla acaulis</i>	2	1.97±0.38	1.70—2.24
小红柳 ² <i>Salla microstachya</i>	2	1.60±0.28	1.40—1.80
马兰 ² <i>Iris lactea</i>	2	1.25±0.11	1.15—1.30
海河流域61种植物 61 species of Haihe River Basin	61	1.29±0.43	0.43—2.12

分析器官: 1, 叶片; 2, 地上部 Parts to be analysed: 1. leaf; 2. above-ground parts

表 2 闪电河流域几种作物不同器官磷含量及与海河流域的比较

Table 2 The contents of P in some crops in Shandian River Basin compared with those in Haihe River Basin (mg·g⁻¹, dry matters)

植物名称 Species	器官 Parts	闪电河流域 Shandian River Basin	海河流域 Haihe River Basin
玉米 <i>Zea mays</i>	根 Root	0.060	0.072
	茎 Stem	0.107	0.103
	叶 Leaf	0.230	0.183
	果 Fruit	0.233	0.266
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	根 Root	0.042	0.102
	茎叶 Stem and leaf	0.036	0.099
	果 Fruit	0.182	0.200
莜麦 <i>Avena nuda</i>	根 Root	0.093	0.092
	茎叶 Stem and leaf	0.136	0.086
	果 Fruit	0.233	—
马铃薯 <i>Solanum tuberosum</i>	根 Root	0.101	0.082
	茎叶 Stem and leaf	0.107	0.119

(图 1, F)。这些现象试解释为: 禾本科作物种子贮存了一定量的磷, 使幼苗阶段磷含量较高, 但在营养期植物生长迅速, 生物量大大增加, 加上土壤供磷不足而使其含量下降; 至果实成熟期, 磷由成熟桔秆向果实及谷粒中转移, 果实含磷量很高, 与根茎叶平均后在果实成熟期最高; 豆科作物的子叶含有高含量的磷, 种子萌发时由子叶中向幼苗运输, 使幼苗

期磷含量很高;果实成熟期虽也会向果实中转移,但此时向土壤吸磷的数量下降,加上干物质也随之增大,故4个部位的平均含磷量较幼苗为低;而对于块茎类作物马铃薯,营养期发达的根系向土壤中吸收了大量的磷,及至末期,吸磷能力下降,且干物质质量却显著增大,吸收减少的磷分配在增大的生物量中,其含量自然下降。油料作物亚麻表现的磷含量动态变化与禾本科作物类规律相似,也是在果实成熟期最高,幼苗期次之,营养期最低。

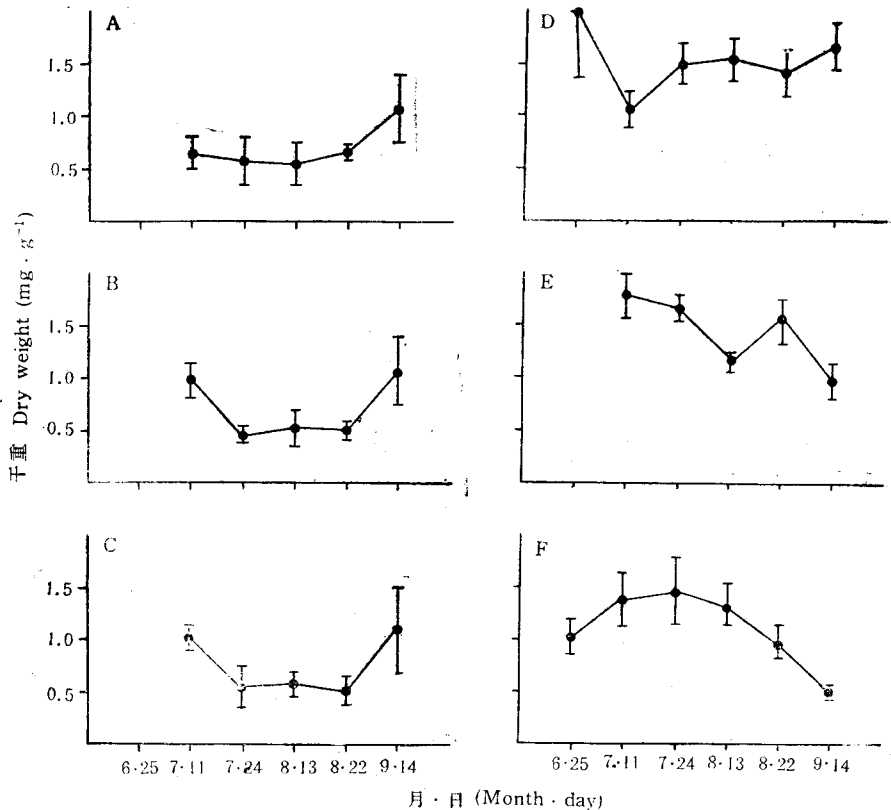


图1 不同作物磷含量在生长季节的变化(1993)

Fig. 1 Seasonal changes of phosphorus contents of different crops in 1993

A: 小麦 *Triticum aestivum* B: 莜麦 *Avena nuda* C: 亚麻 *Linum usitatissimum*
D: 豌豆 *Pisum sativum* E: 蚕豆 *Vicia faba* F: 马铃薯 *Solanum tuberosum*

2.3 不同器官含磷量的动态变化

6种作物不同器官磷含量的变化规律是,根、茎、叶三个器官,幼苗期>营养期>果实成熟期(马铃薯除外,其表现为营养期>幼苗期>果实成熟期);果实,成熟后期>果实形成期。(图2)以小麦为例,根含磷量由幼苗期的 $0.50\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降到果实成熟期的 $0.32\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ($P < 0.01$),茎和叶分别以 0.74 和 $1.23\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降到 0.43 和 $0.68\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ($P < 0.001$);而果实磷含量从灌浆期的 $2.02\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $2.79\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ($P < 0.001$)。这种现象可解释为:生长初期种子贮藏的磷使每个器官含有较高的磷,且此时植物生理活动旺盛,吸磷能力很强,加上土壤中也因刚施过肥,有效磷成分较多,植物吸收的磷最多;但随着生长

的延长,做为吸收器官的根其功能逐渐降低,且发生磷向其他生长器官转移,故含量下降;而做为营养器官的茎和叶,其贮存的磷向果实中转移,使果实中的磷含量逐渐上升,而它们的磷含量却逐渐下降。

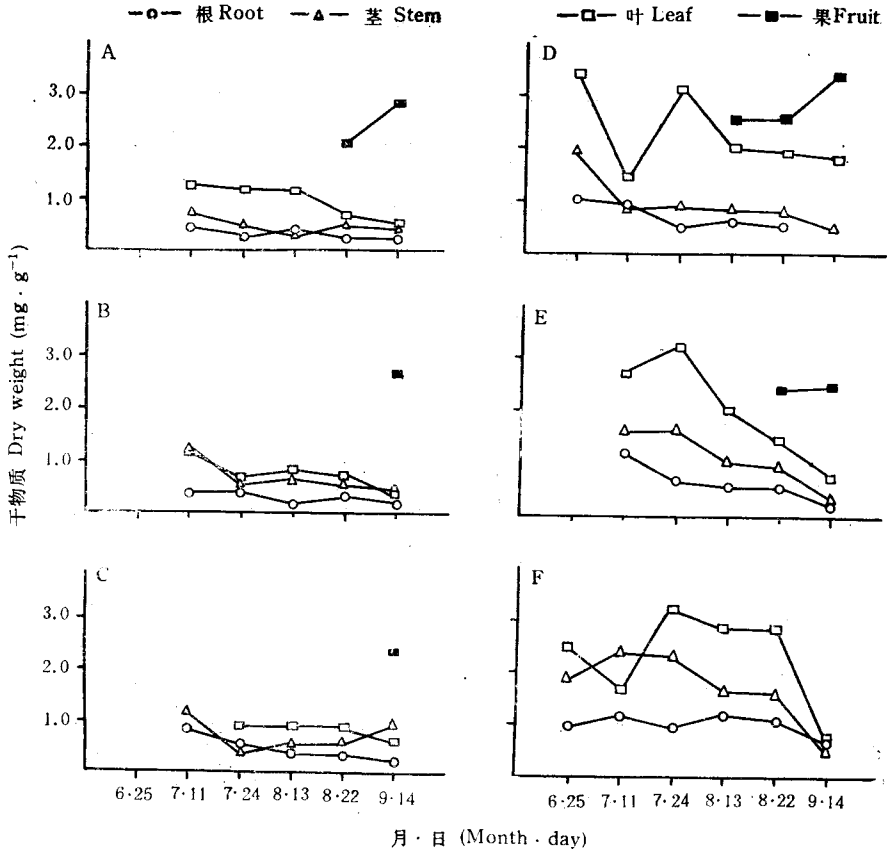


图 2 作物不同器官磷含量在生长季节的变化(1993)

Fig. 2 Seasonal changes of phosphorus contents of different crops in 1993
 A: 小麦 *Triticum aestivum* B: 莜麦 *Avena nuda* C: 亚麻 *Linum usitatissimum*
 D: 豌豆 *Pisum sativum* E: 蚕豆 *Vicia faba* F: 马铃薯 *Solanum tuberosum*

2.4 磷元素在不同器官的转移

磷元素在植物不同器官的相对含量如果在整个生长季节不发生变化,则不同器官之间的磷含量比率应为不变,如果比率值变化,则发生磷在不同器官之间的转移,因而可利用磷含量比率的变化来说明磷在不同器官之间的转移,其中叶、茎之比,茎、根之比、果、茎之比的变化可反映磷元素通过根→茎→叶和根→茎→果或叶→茎→果的转移。6种作物4个器官磷比率的变化如下:

2.4.1 叶和茎之比

禾本科作物小麦和莜麦磷含量叶、茎之比均以幼苗期较低,营养期(7月24日至8月13日)最高,至果实成熟期最低(图3,A),可见磷元素由茎向叶中转移主要发生在叶片生理活动旺盛的时期,此时叶片进行光合作用及蛋白质、脂肪等的合成作用旺盛,需要大量

的矿质营养。豆科作物豌豆和蚕豆除在营养期发生磷元素向茎向叶的运输外，很可能在果实成熟期这种运输也不停止，因为此期仍表现为较高的叶、茎之比。块茎作物类马铃薯磷含量叶、茎之比在整个生长季节基本稳定，只是8月份的比率稍大，但显著度检验不显著($P>0.05$)，说明了磷在马铃薯叶及茎之间的分配较均匀，也可能说明了马铃薯叶及茎在生长时期生理活动均很旺盛，都需要大量的矿质营养(茎在营养期也是绿色光合及合成器官)。

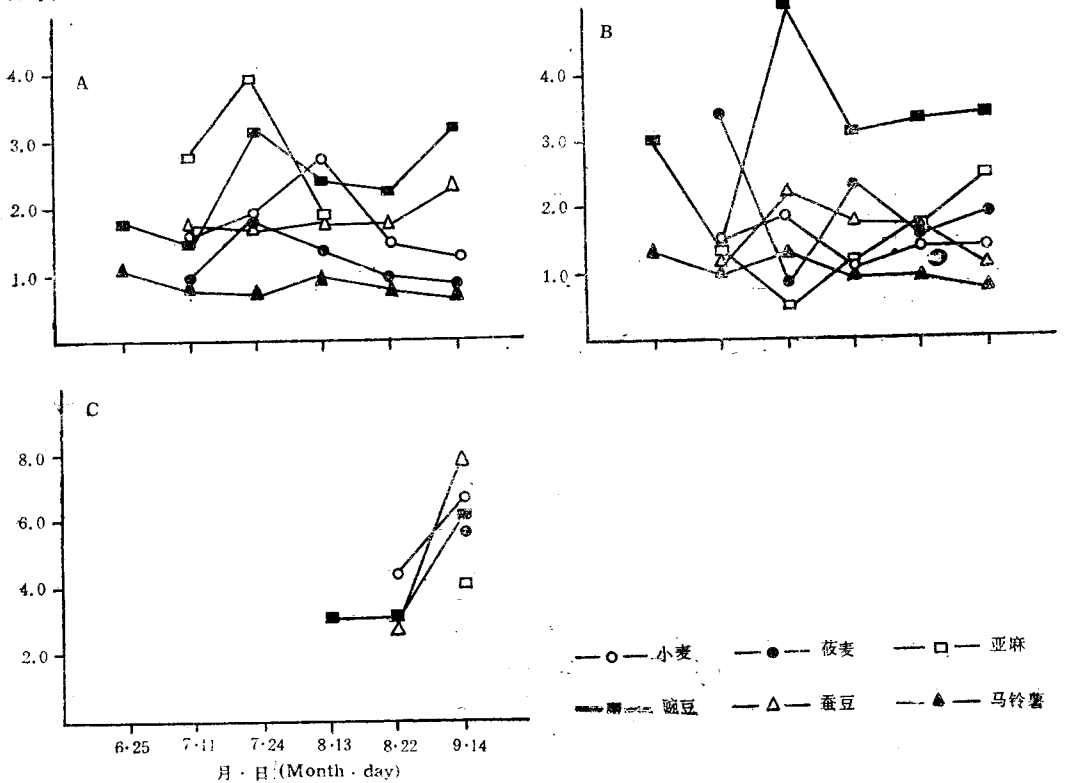


图3 不同器官之间磷含量比率在1993年生长季节的变化

Fig. 3 Seasonal changes of the ratios of phosphorus contents between the different parts of crops in 1993. See species names at the note of Fig. 1
A: 叶/茎 leaf/stem B: 茎/根 stem/root C: 果/茎 fruit/stem

2.4.2 茎和根之比

小麦在生长旺盛的7月底，磷元素含量茎、根之比比较大，其他时期基本稳定，苜蓿根在7月初比率最大，8月初次之(图3B)，说明了这两种禾本科植物在营养生长的旺盛期发生磷由根向茎中运输，而在生长末期这种转移减弱，豌豆在7月底磷由根吸收后向茎中转移最快，表现为最大的茎、根之比，5.89:1($P<0.001$)，蚕豆也是7月初发生磷的转移。油料作物亚麻表现在果实成熟期具较高的茎、根之比，而块茎作物马铃薯依然在整个生长季节具有相对稳定的茎、根之比(图3，B)，说明了磷元素在马铃薯根茎之间均匀分布的特点。

2.4.3 果和茎之比

无论是禾本科作物的小麦还是豆科作物的豌豆和蚕豆，都表现出果实成熟期最高的

磷含量果、茎之比, 如蚕豆由 2.59:1 上升到 7.84:1(图 3C, $P < 0.001$), 说明了作物在果实成熟期发生矿质元素由生长相对不活跃的部位向生殖生理活动旺盛的果实部位迁移, 这与其他学者得出的结论基本一致(蒙格尔等, 1987)。因为苜蓿和亚麻在果实成熟初期没有采集到样品(尚未结果或果实不明显), 无法看出其动态变化, 但就其在果实成熟期较高的果、茎之比来看, 也可证明茎中的磷元素向果实中运输。

综上所述, 在植物营养生长时期, 几乎所有植物都表现最高的叶、茎之比和茎、根之比, 说明了此时期根部吸收的磷元素主要向茎中运输, 而茎又向叶中转移; 在果实成熟期该途径变为根→茎→果。豆科作物除发生上述转移外, 还可能发生根→茎→叶的转移。因而在农业生产中, 在幼苗期尤其是作物即将成熟期施加磷肥效果最好, 有益于提高作物的产量, 相反在营养生长旺盛期施肥, 则仅能促进叶的生长, 但与提高作物产量不利。

3 结论

通过以上分析, 可得出以下几点结论:

1) 闪电河流域不同植物磷的平均含量同海河流域、锡林河流域基本一致, 说明了磷在植物体内具有相对稳定的特点。

2) 不同作物磷含量的动态变化可分为三种类型: 禾本科植物, 果实成熟期 > 幼苗期 > 营养期; 豆科植物, 幼苗期 > 营养期 > 果实成熟期; 块茎类植物, 营养期 > 幼苗期 > 果实成熟期。

3) 不同器官磷含量变化规律是, 根、茎、叶, 幼苗期 > 营养期 > 果实成熟期(马铃薯除外); 而果实则表现为成熟后期 > 果实形成期。

4) 磷在不同器官的转移表现在, 幼苗期及营养期, 根部吸收的磷, 通过根→茎→叶转移, 而在果实成熟期, 植物体内的磷则通过根→茎→果途径移动。

利用这一规律在生产中除注意传统的苗期施肥外, 还应加强作物成熟期阶段的施肥工作, 以提高作物的产量。

参 考 文 献

- 于淑芬、张淑茗, 1993: 山东主要土壤吸磷和供磷能力的研究, 土壤通报, 24(2)63—65。
 王淑敏、柴玉博, 1993: 河北省几种土壤磷肥施用量的估算初探, 土壤通报, 24(6)273—275。
 尹毅、林鹏, 1993: 红海榄红树林的氮、磷积累和生物循环, 生态学报, 13(3)221—227。
 冯固、杨茂秋、白灯沙、黄金生, 1993: 用同位素示踪法研究土壤磷素对不同作物生物有效性的差异, 土壤通报, 24(1)30—32。
 张小川、蔡蔚祺、徐祺、熊毅, 1990: 草原生态系统土壤-植被组分中氮、磷、钾、钙和镁的循环, 土壤学报, 27(2)140—150。
 陈佐忠、黄德华、张鸿芳, 1985: 内蒙古锡林河流域122种植物的元素化学特征, 草原生态系统研究(第一集), 北京: 科学出版社, 112—131。
 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元素地球化学特征、地域分异及其输入、输出量, 环境科学学报, 13(2)244—249。
 蒙格尔 K. 等著(张宜春等译), 1987: 植物营养原理, 北京: 农业出版社, 400—422。
 Chapman, S. B., Rose R. J. & Basanta M., 1989: Phosphorus absorption by soils from heathlands in Southern England in relation to successional change. *Journal of Applied Ecology*, 26: 673—680。
 Chapman, S. B., Rose R. J. & Clarke R. T. 1989: A model of phosphorus dynamics of *Calluna* Heathland. *Journal of Ecology*, 77: 35—48。
 Dickinson, N. M., 1984: Seasonal dynamics and compartmentation of nutrients in a grassland meadow in Lowland England, *J. of Applied Ecology*, 2(2)695—701。

A STUDY ON THE SEASONAL CHANGES OF PHOSPHORUS CONTENT OF SIX CROPS IN THE SHANDIANHE RIVER BASIN, NORTH CHINA

Jiang Gao-ming Han Rong-zhuang

(*Institute of Botany, Academia Sinica, Beijing 100044*)

Sun Jian-zhong

(*Institute of Ecological Environmental Research Centre,
Academia Sinica, Beijing 100083*)

Abstract

The chemical characteristics of phosphorus contents of 15 species in the Shandian River Basin, Hebei Province were measured, and the seasonal changes of phosphorus contents of six crops were studied. The results were as follows: The average phosphorus contents of the 15 species was $1.38 \pm 0.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, with the highest, $2.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and the lowest, $0.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Such a result was resemble to that investigated in Haihe River Basin and Xilinhe River Basin near the same region (North China). The types of seasonal changes of phosphorus contents of the 6 crops varied with the different kinds of crops. For the *Gramineae* crops such as *Triticum aestivum* and *Avena nuda* and the oil-bearing crops, *Linum usitatissimum*, the phosphorus contents changed as a series of, mature period > seedling period > the vigorous period ($P < 0.05$); For the bean crops like *Pisum sativum* and *Vicia faba*, the seedling period > vigorous period > mature period ($P < 0.001$); while for the stem-tuber crops, *Solanum tuberosum*, the seasonal changes of phosphorus content was the vigorous > seedling period > mature period ($P < 0.001$). The different organic parts showed the different patterns of seasonal phosphorus changes, for roots, stems and leaves of the crops (except for *Solanum tuberosum*), seedling period > the vigorous period > mature period; while for the fruits, the end of mature period > the fruit-forming period. The ratios of phosphorus content between root and stem, stem and leaf, as well as stem and fruit could indicate the movements of phosphorus in the plants. The results showed that phosphorus moved along the way of root \rightarrow stem \rightarrow leaf during seedling period or the vigorous period, and root \rightarrow stem \rightarrow fruit during the fruit mature period.

Key words Phosphorus contents, Seasonal changes, Phosphorus movements, Crops, The Shandian River Basin