

# 磷在羊草草地植物-土壤中积累、 分布及转移规律

傅林谦

(中国农业科学院畜牧所,北京 100094)

祝廷成

(东北师大草地研究所,长春 130024)

**摘要** 本文在研究磷素几种形态的动态变化基础上,运用生态系统理论,利用系统分析的方法,分析了磷在植物-土壤系统中的流通、积累和归还的特点,得出如下结果:

1. 磷素在系统内 99% 以上分布在土壤中。2. 群落内磷的再利用量为  $3.6755 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。3. 群落每年吸收的磷为  $3.4063 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 地上部归还土壤为  $0.1447 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 地下部归还土壤为  $1.8111 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 输出仅占吸收量的 42.24%, 磷素在群落中每年净积累为  $0.35 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。4. 磷在各库内的周转时间是: 地上植物活体为 1.3364 年, 立枯体为 6.4350 年, 活根为 1.0887 年, 死根为 2.4378 年, 有机磷为 833.3 年。

**关键词** 磷素循环; 羊草草地

磷在植物生命活动中起着相当重要的作用,我国大部分草原地区的土壤处于严重缺磷状况,特别是北方草原区<sup>[7]</sup>,限制着草地的生产能力。因此对磷在草地生态系统内转化和积累规律的研究,早就引起了研究者的重视<sup>[3-6,8-12,14,16,17,19,23-25]</sup>。

磷素在系统中存在形态复杂,并有多种转化途径。从磷在草原生态系统内循环研究的综述<sup>[1]</sup>中可以看出,70年代以前对磷素的了解比较肤浅。自 1972 年张守敬提出无机磷分级方法, Halm<sup>[8]</sup>发现草原生态系统中有机磷的作用后,研究者对磷素的认识才深入了一步。此后, Bowman<sup>[22]</sup>提出草原生态系统有机磷分级方法, M. J. Hedley<sup>[20]</sup>提出微生物磷熏蒸测试法,使土壤中磷的形态逐渐明朗化。但是,对草原生态系统的研究并没有随之深入,对系统磷在各个形式之间的转化关系,流通量及流通速率的研究尚需进一步探讨。

本文在研究磷素几种形态动态变化的基础上,分析了归还的特点,并建立了磷素的季节动态模型和年间动态模型。

## 1. 自然概况和样地描述

研究地点位于吉林省白城专区,长岭种马场内。地理位置为东经  $123^{\circ}30'$ — $124^{\circ}10'$ , 北纬  $44^{\circ}30'$ — $44^{\circ}45'$ , 海拔 140—160 m, 年均气温  $4.9^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温为  $2919.7^{\circ}\text{C}$ , 无霜期为 130—150 天, 年降水量为 470.6 mm, 集中降于 6—7 月份。春季干旱少雨, 年蒸发量为

1668mm。

样地以羊草(*Leymus chinense*)为优势种,其综合优势度高达100%,样地位于长期放牧地内,由于以前利用不合理,草地退化,有的地方已形成碱斑。自1985年进行保护以来,每年仅限于春季轻度利用。据估计家畜采食量一般为21%。该地区土壤有机质含量为2.503%,全磷含量为0.092%,全氮含量为0.22%,水解氮含量为 $18.2\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}(\pm)$ ,速效磷含量为 $7.8\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}(\pm)$ 。

## 2. 材料和方法

2.1 样品的采集和处理:地上部取样,1 m<sup>2</sup>重复3次,已基本反映植物群落变异。每个样方植物按种分开,每种死体和活体不同器官分开,在100℃下烘干1h,然后在60℃下烘48h装在样品瓶内保存,待分析用。地下根系是采用土壤剖面挖掘法取样,长宽各25cm,深0—40cm,重复5次,然后分出死根、活根,烘干待用。土壤也随根系依照土壤农化分析取样方法同时采集,阴干,粉碎,待分析。取样时间为1989年4月到1990年10月,每隔30天取样一次。

### 2.2 分析方法

- a. 植物样品: 1、2、4-氨基萘酚磷酸比色法。
  - b. 速效磷: NaHCO<sub>3</sub>法<sup>[1]</sup>。
  - c. 矿物磷<sup>1)</sup>组分: 南京农学院(1980)。
  - d. 有机磷组分: Bowman and Cole法(1978)<sup>[22]</sup>。
  - e. 微生物磷: M. J. Hedley法(1982)<sup>[20]</sup>。
- 各种形态的磷均用紫外分光光度计测定。

## 3. 结果和讨论

### 3.1 磷在羊草草地植物-土壤中的分配

根据植物的现存量和体内浓度,可计算出植物磷的贮量;同理根据土壤每100g干土中各种形态磷的含量和土壤容重,可以推算出单位体积磷的贮量。如表1所示。当地上活体生物量达到最大时,地上活体中磷素贮量仅占亚系统内全磷的0.05%,为 $1.964\text{kg}\cdot \text{ha}^{-1}\cdot \text{yr}^{-1}$ ;活根中磷的贮量要比地上活体大的多,占亚系统内全磷的0.135%。群落中包

表1 放牧地植物-土壤中磷素的分布

Table 1 Distribution of P between the plant-soil in grazing ecosystem

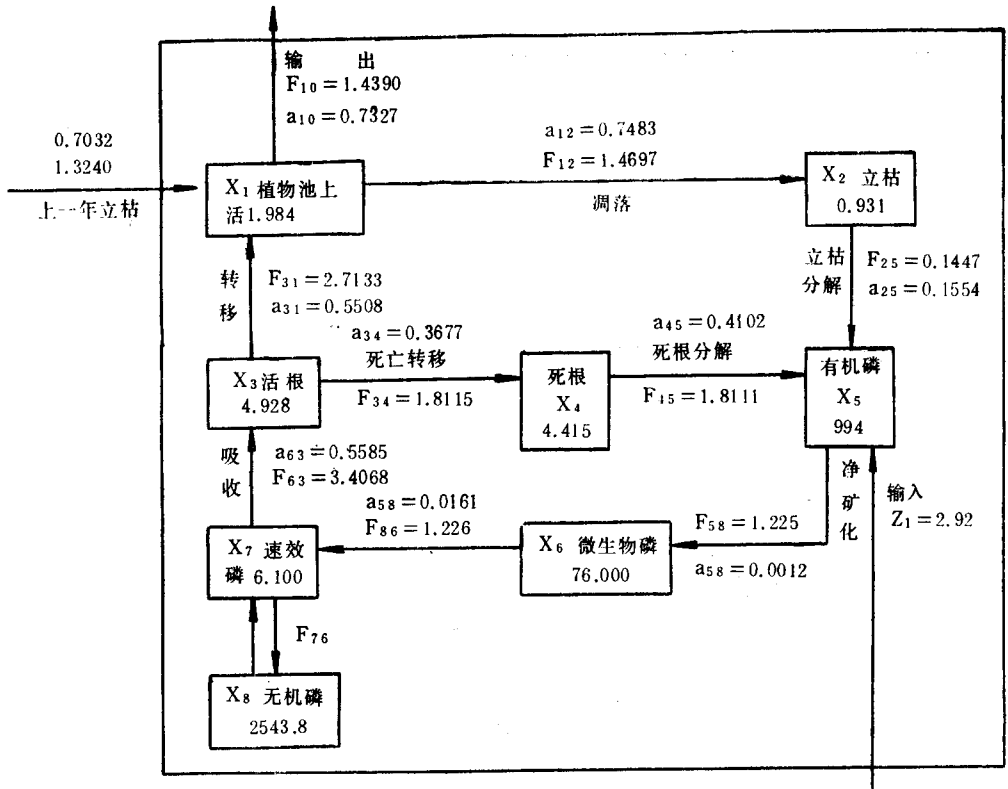
项 目 \ 系 统 分 室	羊草 地上 活体	立 枯	活 根	死 根	速 效 磷	有 机 磷	矿 物 磷	微 生 物 磷	土 壤 全 磷	系 统 全 磷
量 kg/ha	1,984	0,931	4,926	4,415	6,100	934	2543.8	76.00	3619.9	3632.14
比例 %	0.05	0.03	0.14	0.12	0.17	27.3	69.9	2.1	99.5	100

1) 矿物磷包括Fe-P, Al-P, Ca-P, O-P。

括死体和活体的磷贮量比例为0.45%；大部分磷分布于土壤中，占99.95%，其中，速效磷占0.17%，有机磷占27.34%，矿物磷占69.95%，微生物磷占2.09%；因此，提高植物对土壤中磷的吸收能力及其有效性将是关键的问题。

### 3.2 羊草草地植物-土壤中磷素流通量的计算

植物中磷素的转移是由老器官向新器官转移，土壤中磷素的转移是一个颇为复杂的问题，其中相互转化机制目前仍处于定性研究阶段。因此，在分析中，我们将土壤中参与循环的各个库设为黑箱，各库之间的流线只划一条，为负时则是向反方向转移，简化了流程。用系统分析方法探讨磷素在各分室的流通量(单位时间内从一个库转移到另一个库的量，本文设为一个月)。如图1示。将循环划分为8个分室，并建立系统各分室状态变化的微分方程组：



放牧地 (状态量以8月份为初始值)

图1 放牧地植物-土壤中磷素循环图

Fig.1 The Cyclig of P between the Plant-Soil in Grazing Ecosystem

- X<sub>1</sub>——植物群落地上部活体磷总量g/m<sup>2</sup>。
- X<sub>2</sub>——地上部枯死体P总量(包括立枯体和凋落物) g/m<sup>2</sup>
- X<sub>3</sub>——地下部活根系中P总量g/0.4m<sup>3</sup>
- X<sub>4</sub>——地下死根中P总量(包括半分解根) g/0.4m<sup>3</sup>
- X<sub>5</sub>——有机Pg/0.4m<sup>3</sup>
- X<sub>6</sub>——微生物Pg/0.4m<sup>3</sup>
- X<sub>7</sub>——速效Pg/0.4m<sup>3</sup>
- X<sub>8</sub>——矿物Pg/0.4m<sup>3</sup>

$$dx_1/dt = F_{31} - F_{12} - F_{10}$$

$$dx_2/dt = F_{12} - F_{25}$$

$$dx_3/dt = F_{63} - F_{34} - F_{31}$$

$$dx_4/dt = F_{34} - F_{45}$$

$$dx_5/dt = F_{25} + F_{45} - F_{58} - Z_1$$

$$dx_6/dt = F_{76} + F_{36} - F_{63}$$

$$dx_7/dt = -F_{76}$$

$$dx_8/dt = F_{58} - F_{36}$$

已知  $F_{25}$ 、 $F_{10}$ 、 $F_{45}$ 、 $F_{25}$  和  $F_{45}$  是依据郭继勋<sup>[10]</sup>得到。为了了解磷素淋溶时损失,特用 15cm 直径,深 50cm 铁筒取原状土,从上向下淋洗土壤,将下渗水收集、分析,发现无效效磷成份。许多研究者<sup>[10]</sup>认为磷以有机质形式损失的较多,因此将有机磷淋失为一输出量  $Z$  观测其变化。

首先建立一组差分方程:

$$x_i(t+1) - x_i(t) = F_{ij}x_j$$

其中,  $x_i(t)$  为  $t$  时刻各分室状态变量值,  $x_i(t+1)$  为  $t$  时刻下个月各分室状态变量值。解出  $F_{ij}$ ,由此得出放牧场植物-土壤间磷素循环图。

### 3.3 磷在系统中各分室间流动的季节动态模型

为了探明植物内磷素的流动特点、土壤各种形态磷的转化规律以及植物吸收和归还量,按以上各分室之间的关系(见图 1),计算出磷在各分室之间的流通速率(单位时间内从一个分室转移到另一个分室的量占此时状态变量的比例)。

由于,流通量( $F_{ij}$ ) = 流通速率( $a_{ij}$ ) × 状态变量( $X$ )

表 2 放牧地植物-土壤中磷素在各分室的流通速率

Table 2 P flux between the plant-soil in grazing ecosystem

返青天数 参 数	30	60	90	120	150	180
$a_{10}$	0.20	0.20	0.20	0	0	0
$a_{12}$	-1.0944	-0.4253	0.1085	0.2737	0.3304	-2.2800
$a_{25}$	0.0151	0.0345	0.0678	0.1419	0.0301	0.0122
$a_{31}$	0.3846	-0.1979	0.0280	0.6160	-0.1778	-0.2927
$a_{34}$	-0.1298	0.0027	0.0457	0.3849	-0.1881	0.4282
$a_{45}$	0.0069	0.0136	0.0205	0.1620	0.1709	0.1998
$a_{58}$	0.0917	-0.1115	0.5171	0.0534	0.2176	-0.5414
$a_{63}$	-0.2546	-0.2467	0.0218	0.4288	-0.2234	1.1016
$a_{76}$	-0.0641	0.0627	-0.1698	-0.0245	-0.0877	0.2308
$a_{10}$	3.9039	-2.4598	15.9879	0.8518	2.9443	-9.1330
$Z_1$	-0.0797	0.6351	-1.0425	0.1306	-0.4460	0.1540

$$a_{ij} = F_{ij}/X_i$$

建立磷的系统分析模型如下:

$$dx_1/d_t = a_{31}x_3 - a_{12}x_1 - a_{21}x_1$$

$$dx_2/d_t = a_{12}x_1 - a_{25}x_2$$

$$dx_3/d_t = a_{63}x_6 - a_{34}x_3 - a_{31}x_3$$

$$dx_4/d_t = a_{34}x_3 - a_{45}x_4$$

$$dx_5/d_t = a_{25}x_2 + a_{45}x_4 - a_{58}x_5 - Z_1$$

$$dx_6/d_t = a_{76}x_7 - a_{86}x_8 - a_{63}x_6$$

$$dx_7/d_t = -a_{76}x_7$$

$$dx_8/d_t = a_{58}x_5 - a_{86}x_8$$

参数见表 2, 它随群落生长时间而变化。

#### 4. 参数生态学意义的分析和解释

$a_{ij}$  值为负表示由  $j$  库流入  $i$  库的量占  $i$  库量的比。如为负时, 则表示上一年立枯体转移到活体中的磷占此刻活体磷的比例; 参数的变化还表示一种程度, 如  $a_{63}$  根系吸收磷能力在春季和 8 月较强, 其中以春季生长初期根系吸收能力为最强。即地上部营养生长初期, 地下部吸收能力也强。此参数是由两年测得的, 还要考虑其它因子的影响, 在实践中不断修正和补充, 才可达到预测的目的。

#### 5. 磷素年间循环模式

将各库之间季节流通量加到一起, 可以得出年间流通量, 与 8 月状态变量之商为年间流通速率。

了解磷素在群落中的积累和迁移, 可知道磷素循环是否处于稳定状态。如图 1 所示群落内根系吸收磷的 55.08% 转移到地上。其中 73.27% 输出, 74.83% 转移到立枯体中(包括对上一年磷的再利用量); 活根中的磷 36.77% 转移到死根库, 8.15% 积累在活根内。群落年吸收量为  $3.4068 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  其中输出  $1.4380 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 存留在群落中  $0.012 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 地上部归还土壤中  $0.1447 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 地下部归还土壤  $1.8111 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。从中可以看出, 群落处于积累状态, 地下根系磷素归还土壤是主要的。

在群落中吸收的磷可提供下一年植物再生。群落磷的再利用量是指死体脱落前转移到生长器官内, 并重新加以利用的量。

磷素再利用量 = (凋落 + 立枯) 转移到活体中的磷 + 死根脱落前转移到活体中的磷。

死体向活体的转移是连续不断的, 在此采用年净转移量表示, 那么群落内磷的再利用量为  $3.6755 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。其中, 地上为  $1.324 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , 地下  $2.3515 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

周转时间 = 1/流通率。

由此, 计算出磷在各分室的周转时间为:

地上植物活体: 1.3364 年;

立枯体: 6.4350 年;

活根: 1.0887 年;

死根: 2.4378年;

有机磷: 833.3333年。

磷素在系统内的流动是受很多因子限制的,同时也与其它元素循环密切相关。本研究所得结果,还需要在以后的研究中不断补充和验证。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所, 1978: 土壤理化分析, 上海科学技术出版社。
- [2] 沼田真著, 姜恕, 祝廷成译, 1986: 草地调查手册, 科学出版社。
- [3] 张小川, 1989: 关于草地生态系统养分循环的计算, 土壤, 21(3)158—159。
- [4] 张小川、蔡蔚祺、徐琪, 1990: 草原土壤-植被系统中 Si, Al, Fe 和 Me 的循环, 生态学报, 10(2)109—114。
- [5] 林鹏、林光辉, 1985: 九江口红松林的研究, 秋茄群落的氮、磷积累和循环, 植物生态学与地植物学丛刊, 9(1)21—30。
- [6] 郭继勋, 1988: 羊草草甸植被落叶的分解、积累与营养物质含量的动态, 植物生态学与地植物学丛刊, 12(3)197—203。
- [7] 鲁如坤, 1989: 我国土壤氮、磷、钾的基本概况, 土壤学报, 26(3)280—286。
- [8] 夏荣基、金鸿志等译, 1981: 荷兰皇家学会著, 农业生态系统中矿质养分的循环, 农业出版社。
- [9] 樊奋成、贾慎修, 1980: 河北坝上地区干草原磷循环的模式, 中国草原, 5: 1—6。
- [10] A. F. Harrison, 1990: 土壤有机磷——文献综述, 土壤学进展, 18(4)11—19。
- [11] A. N. Sharpley 著(李荣庆译), 1985: 不施肥与施肥农业土壤中磷的循环, 北京农学院译丛, 第10期: 55—57。
- [12] A. P. Jupp, E. J. Newman and K. Ritz, 1987: Phosphorus turnover in soil and its uptake by established *Lolium derene* plants, J. of Applied Ecology, 24: 969—978。
- [13] B. Bar-Yosef, U. Kafkafi and E. Bresler, 1972: Uptake of phosphorus by plants growing under field condition, Theoretical Model and Experimental Determination of its Parameters, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 783—788。
- [14] C. A. Jones, C. V. Cole and N. Sharpley, 1984: A Simplified soil and plant model, Soil Sci. Soc. Am J., 48: 800—816。
- [15] Curtis J. Rickardson, 1986: Process controlling movement storage and export of P in a fen peatland, Ecological Monographs, 56(4)279—302。
- [16] C. V. Cole, 1977: A Simulation of phosphorus cycling in semi-arid grassland, Ecology, 58(1)1—15。
- [17] F. J. Stevenson, 1985: Cycles of soil C. N. P. S. and micronutrient: A. Witer-Inter Science Publication。
- [18] Halm, 1972: The Phosphorus cycle in a grassland ecosystem, ph. D Thesis, Dep. Soil Sci. Univ. Saskatchewan Canada, 170p。
- [19] Kat. Lajtha and William H. Schlesinger, 1988: The Biological P cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence, Ecology, 69(1)24—39。
- [20] M. J. Hedley and J. W. B. Stewart, 1982: Method to measure microbial phosphate in soil, Soil Bio. Biochem., 14: 377—385。
- [21] Ola Palm, 1987: Nutrient cycling in paddy rice of traditional farming system, dry zone, Sri Lanka, Trop. Agric., 4(2)。
- [22] R. A. Bowman and C. V. Cole, 1987: An Exploration method for fractionation of organic P from grassland, soil, Soil Sci., 125(2)95—101。
- [23] R. G. Risser, F. C. Birney, 1981: True prairie ecosystem, Hutchinson Ross Publishing Company。
- [24] R. G. Woodmansee and P. A. Puncan, 1980: Nitrogen and phosphorus dynamics and budgets in annual grassland, Ecology, 61(4)893—904。
- [25] S. B. Chapman, R. J. Clarke, 1989: A Model of the P dynamics of Calluna heathland, J. of Ecology, 77: 35—48。

## PHOSPHORUS BUDGETS AND CYCLING IN *LEYMUNES* *CHINESES* GRASSLAND

Fu Lin-qian

(Institute of Animal Husbandry, Chinese Academy of Agricultural Sciences,  
Beijing 100094)

Zhu Ting-cheng

(North-East Normal University, Changchun 130024)

### Abstract

We studied the P allocation, dynamics, accumulation and return rate, major fluxes and turnover in a *Leymunes chineses* grassland community in the northeastern part of China. Our results show 1) that over 99% of the P in the system is distributed in the soil; 2) that the P re-utilization rate in the community is  $3.6755 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ; 3) that the P uptake rate, return rate from the aboveground, return rate from the belowground and net community accumulation rate are  $3.4063 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ,  $0.1447 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ,  $1.8111 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , and  $0.35 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , respectively, and the total P output accounts for 42.24% of the total P uptake; 4) that the P turnover times in live plant, standing dead matter, dead roots, live roots and organic phosphorus are 1.3364, 6.4350, 2.4378, 1.0887 and 833.3 years, respectively.

**Key words** Phosphorus cycling; *Leymunes chinese* grassland