

# 南方红壤草地生态系统持续发展 与经济施肥问题探讨\*

文亦芾

(云南农业大学动物科学技术学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 草地生态持续发展研究是当今草地生态学研究的主要内容之一。我国南方红壤地区草地资源十分丰富, 具有广阔的开发利用前景, 但由于红壤自身特性和不合理的施肥管理制度, 致使该地区草地生态系统严重退化, 草地生产力低。从红壤草地肥力特性和生态系统养分循环与平衡方面, 阐述了该地区草地生态系统持续发展中施肥重要性及研究现状, 以期为我国南方现代化草地畜牧业的持续发展提供理论依据。

**关键词:** 草地生态系统; 可持续发展; 施肥; 红壤地区

中图分类号: S 688.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X(2005)03-0375-06

## The Studies on Sustainable Development and Fertilization of Grassland Ecosystem in Red Soil Region of China

WEN Yi-fei

(College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The research of sustainable development in grassland is one of the main content in ecology. The resource of grassland in southern red soil region is very abundant, having the vast development prospect. Because of red soil characteristic and unreasonable fertilization, grassland ecosystem deteriorated seriously and productivity decreased greatly. This text is from the characteristic of red soil with ecosystem system nutrient circulating and equilibrium aspect, expatiating the importance and the present development condition of fertilization in grassland ecosystem on this area. It can provide useful advices for sustainable development in livestock industry in southern area of China.

**Key words:** grassland ecosystem; sustainable development; fertilization; red soil region

土壤作为某一陆地生态系统中的组成成分,起着极为重要和积极的作用,因为土壤与该系统相互依存,相互制约,土壤的变化影响着生态系统的发展,并随生态系统的发展而变化。十分明显的是,土壤在很大程度上决定着生态系统的生产能力,并且体现该系统功能的生物与环境之间物质流与能量流的绝大部分又是通过土壤进行的。所以在研究草地生态系统时,也和研究农田生态系统等其它

陆地生态系统一样,都将土壤当作主要的研究内容。近20年来,又有将土壤本身视为独特的生态系统而进行研究的<sup>[1]</sup>。

土壤是任何一类草地植物赖以生长繁殖的基础,在了解各类草地所处的环境和它与环境之间的关系时,草地土壤的研究是必不可少的。在早期的草地生态系统研究工作中,不少生态学家和土壤学家,都曾着力的讨论过草地土壤类型及其性状,对

收稿日期: 2004-11-15

\* 基金项目: 云南省自然科学基金项目(2002C00201)

作者简介: 文亦芾(1972-),女,山西稷山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事草地可持续发展研究。

于各种草地土壤的理化性状和管理利用方面也有所涉及<sup>[2~4]</sup>。从草地生态系统的角度去研究土壤,起步就比较晚,只是在近年来随着草地生态系统定位,半定位研究的开始才开展起来的;在草地物质循环方面,结合植物年生长量的成分,从土壤—植物界面上对草地土壤营养元素年变化进行了动态研究;而在土壤生物方面,主要进行了土壤微生物种类、分布、季节变化、生物量的研究。尽管已经做了上述诸方面的研究工作,取得了不少有益的数据和资料,但从草地生态系统的整体研究来衡量,也只能算是收集了某些结点上的本底资料,彼此之间尚未联成一个网络。以土壤肥力为中心的土壤生态系统研究,在草地土壤上,可以说仍未开展,因此,距揭示系统功能的本质,尚有很大一段距离。

“七五”至“八五”期间,虽已在南方红壤地区进行了人工草地建植、管理,配套技术利用及放牧系统优化的试验研究,解决了一批关键性技术,实现了从单项技术到系统集成的突破,完成了实验监测系统的总体优化,开始了向提高系统生产效率和经济效益的转变。然而,实现该地区草地畜牧业持续发展的任务却是十分艰巨的。该地区为喀斯特的主要分布地区,石灰岩山地占贵州省总面积的 75%,占云南省总面积的 28.8%,土壤类型为红壤。红壤是在高温多雨气候下形成的具有明显脱硅富铝化特征的地带性土壤,土壤风化淋溶强烈,粘土矿物以高岭石为主,含有大量的 Fe, Al, Mn, Ti 等氧化物,固磷作用强,矿质元素大量淋失, H<sup>+</sup> 浓度高,盐基饱和度低,酸度强,是一种即酸又瘦的低产土壤。在这样的土壤条件下,如何为牧草高产稳产提供一个良好的生态环境,从而最大程度地开发草地资源就成为云贵高原人工草地持续发展与永久利用的关键性问题。

### 1 红壤形成的自然地理背景

我国热带、亚热带地区,广泛分布着各种红色或黄色的土壤,由于它们在土壤发生和生产利用上有共同之处,统归为红壤系列或富铝化土纲,包括砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤等土类<sup>[5]</sup>。红壤形成于亚热带生物气候条件下,总热量虽不如砖红壤区高,但气候温暖,雨量充沛,无霜期长(240~300 d),红壤的原生植被为亚热带常绿阔叶林,其中以壳斗

科的栲属、石栎属和冈栎属占优势。红壤上的生物生长量很大,在亚热带常绿阔叶林下,每年凋落于地表的枯枝落叶干物质 3 750~4 500 kg/hm<sup>2</sup>。红壤的形成主要是富铝化和生物密集两种过程长期作用的结果<sup>[6]</sup>。在红壤的脱硅与富铝化作用中,土体中的硅酸盐类矿物被强烈地分解,硅和盐基遭到淋失,而铁、铝等氧化物则明显聚积,粘粒与次生矿物不断形成。这些情况说明,在红壤发育过程中,虽然进行各元素的淋失与富铝化过程,但由于生物的富集和土壤与植物间的物质循环与交换,大大丰富了土壤养分物质的来源,促进了红壤肥力的发展。

### 2 牧草对红壤肥力的培育

在红壤丘陵地区,由于风化和淋溶作用强烈,土壤的矿质养分含量一般偏低,酸性较强,而在自然植被破坏或开垦后,土壤中有机质的分解速率高,又易导致土壤有机质含量偏低。因此,在开垦历史长和利用集约的条件下,红壤往往存在土壤瘦、酸、板的问题。针对红壤肥力低,土壤易板结,种植牧草以增加土壤有机质,是改良和培育土壤肥力的一个关键性措施。亚热带牧草含干物质约 10%~30%,鲜草中含氮(N) 0.4%~0.8%,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 0.1%~0.15%,钾(K<sub>2</sub>O) 0.3%~0.5%。据广东对 13 种牧草的测定,豆科牧草地上部分与地下部分的比值一般在 0.93~1.56 之间,禾本科牧草为 0.68~0.79。由于牧草地上和地下部分都具有丰富的有机质和养分,改土效果极为明显,所以在红壤地区广泛流行着“绿肥种 3 年,瘦田变肥田”的谚语。

### 3 南方红壤草地的利用现状

我国现有草地 4.0 × 10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>,其中南方有草地 6 000 万 hm<sup>2</sup>,其中绝大部分为丘陵或山地,土壤为红黄壤。该地区未开发利用的红壤荒地占总面积的 26%,荒地面积达 6 600 万 hm<sup>2</sup>,相当于新西兰草地面积的 5 倍,目前,用于牧草生产的土地为 47 万 hm<sup>2</sup>。综合分析认为<sup>[7]</sup>,在不久的将来约有 4 460 万 hm<sup>2</sup> 可用于开发和发展高生产力的牧草(表 1)。从利用草地面积看,生产潜力最大的 5 个省是广西、云南、湖南、湖北和四川<sup>[8]</sup>。

表1 南方红壤地区土地资源利用现状<sup>[5,9,10]</sup>Tab. 1 Utilization actuality of soil resources in southern red soil area  $\times 10^3 \text{ hm}^2$ 

省份	总土地	耕地	林地	总草地	利用草地	可利用草地
云南	38 361	4 716	17 516	14 667	86	6 000
贵州	17 622	3 033	6 425	5 333	62	3 733
四川	56 547	13 066	1 948	6 819	200	5 076
广西	23 641	3 714	9 709	1 2854	10	7 993
广东	21 303	5 410	9 200	2 900	8	2 320
湖南	21 183	4 703	10 756	6 333	24	5 600
湖北	18 595	6 614	6 881	6 419	33	5 077
福建	12 229	2 081	7 451	2 062	12	1 650
江苏	10 505	6 131	273	413	3	325
浙江	10 498	2 995	4 897	3 169	22	2 075
安徽	14 017	6 771	3 334	1 663	1	1 485
江西	16 695	4 442	9 553	3 842	11	3 313
合计	267 797	63 678	10 593	66 474	472	44 649

表2 我国近年来化肥施用量,生产量和进口量

Tab. 2 Employ, produce and Input quantity of fertilization in recent years in China 万 t

年份	化肥施用量				化肥生产量				化肥进口量			
	总计	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	总计	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	总计	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
1980	1269	942	288	39	1232	999	231	2.0	229			
1981	1335	959	326	50	1239	986	251	2.6	256	146	44	67
1982	1514	1064	382	68	1278	1022	254	2.5	292	180	63	49
1983	1660	1190	398	72	1378	1109	267	2.9	403	236	103	63
1984	1740	1253	397	90	1460	1221	236	3.1	495	285	134	76
1985	1930	1367	457	106	1322	1144	176	2.4	312	206	90	16
1986	1776	1259	308	109	1393	1159	232	2.5	253	160	48	45
1987	1996	1389	484	123	1670	1342	324	4.0	527	287	117	123
1988	2142	1490	412	140	1727	1361	361	5.3	711	430	139	141
1989	2357	1620	570	167	1793	1424	366	3.2	672	399	155	118
1990	2590	1740	647	203	1880	1463	412	4.6	775	445	155	174
1991	2806	1848	719	239	1980	1510	460	9.7	937	461	284	192
1992	2930	1895	765	270	2048	1570	462	15.2	892	470	223	199
1993	3152	1994	861	297	1956	1526	419	11.7	510	228	128	154
1994	3318	2062	925	331	2188	1671	497	20.2	695	263	223	209
1995	3595	2224	995	376	2587				1058			

资料来源:李家康和林葆,1996<sup>[9]</sup>,《中国农业年鉴》1980~1996。

#### 4 南方红壤人工草地施肥研究进展

##### 4.1 草地施肥效应研究

我国是个发展中国家,用占世界7%的耕地养活了世界22%的人口。长期以来,我国的肥料生产能力有限,无论是N肥,还是P,K肥,均需进口(表2)。20世纪90年代以来,由于农业生产的需要,化肥施用量更是成倍增加,20世纪80年代为施用量的20%左右,20世纪90年代上升为30%以

上,现在的问题是,我国是一个发展中国家,肥料生产不可能增长过快,而且在近期内,肥料也将长期主要用于满足粮食生产<sup>[9,10]</sup>。因此认为,以平衡施肥、提高肥料利用率为主体的南方人工草地推荐施肥技术研究将成为人工草地畜牧业持续发展的关键技术问题。

自20世纪90年代以来,随着南方畜牧业的兴起,各地开展了多方面、多层次的红壤人工草地合理施肥研究。赵俊权就NPK对非洲狗尾草及纳罗

克种子产量和干物质影响<sup>[13]</sup>; D. L. MICHALK, 黄志凯对地三叶在亚热带酸性瘠瘦土壤上的反应<sup>[12]</sup>; 谭红对牧地施石灰对白三叶的养分影响<sup>[13]</sup>进行了报道。同时, 围绕人工草地定植及施肥量研究和占星, 黄必志对以纳罗克狗尾草及距瓣豆为建植种的温带人工草场施肥量进行了探讨<sup>[14]</sup>。对人工草地微量元素试验也有以下报道, 屠敏仪, 林洁荣<sup>[17]</sup>。徐明岗围绕牧草的营养特点和土壤特性, 对南方红壤丘陵区牧草栽培的合理施肥进行了研究<sup>[8]</sup>。从上述报道可以看到, 目前国内南方人工草地合理施肥的研究, 主要集中在对引进的栽培品种进行的产量及牧草营养对施肥效应反应两方面的研究。

## 4.2 放牧系统养分循环研究

### 4.2.1 放牧系统养分循环研究意义

养分循环是生态系统最基本的功能之一。人工草地放牧生态系统是人工生态系统, 不同于自然生态系统, 在养分循环方面, 它不像自然生态系统那样, 可以无限地自然延续, 人工草地放牧生态系统在每一个循环周期中都或多或少地有养分的损失, 但仍能得到不断持续发展主要靠人为因素的补给和控制, 所以在人为因素控制下的草地养分循环, 是建立持续草业的物质基础。但是, 不合理的人类活动也可能对草地生态系统造成不利影响, 例如, 不合理利用草地, 不仅导致草地生产性能降低, 同时造成草场过度退化; 不合理施肥, 又会造成对草地肥力的不利影响。因此, 深入了解草地放牧生态系统养分循环特征, 提高人类在调控养分循环方面的自觉性, 使草地向有利于人类需要的方向发展, 这就是研究草地养分循环的根本目的。

### 4.2.2 人工草地营养物质循环与转移研究进展

养分循环的早期研究是从植物生理研究开始的。本世纪初, 人们就对不同养分元素的植物营养生理进行了较细致的研究。但由于当时还未形成系统的概念, 各方面的研究都是独立进行的生理生化过程, 研究的重点集中在植物对养分的吸收、代谢、运转及形态转化等方面。由于植物系统的复杂性, 这些研究大多在培养液中进行, 养分吸收的大多数研究是用离体根完成的<sup>[18]</sup>。尽管这些是不自然的处理, 但它们仍为生态学家积累了大量资料。植物营养生理、土壤物理及土壤化学等单项独立过程显然不能反映土壤—植物系统养分动态的全貌, 所以要确立土壤—植物系统养分循环必须将这

三者有机结合起来进行动态研究。1955 年 ALLISON 将系统和整体的观点引入生态系统物质循环的研究后, 农业生态系统养分循环成为世界各国生态学家、土壤学家、农学家所关注的研究热点。研究方法通常是基于生态隔离和分室模型来进行的动态平衡研究, 它将养分的吸附、解析、迁移、转化与植物吸收等过程放在一起来处理。通常采用小型室内、室外仿真生态系统来模拟真实系统, 以达到定量研究的目的<sup>[16,17]</sup>。但是这类研究方法, 由于控制条件较为严格, 排除了自然生态系统中许多干扰因素, 因此其研究结果误差较大, 没有自然生态系统中的田间试验准确。

近年来人们对生态系统的养分循环和平衡给予了愈来愈大的关注。比如 20 世纪 60 年代初期开始实施的国际生物学计划 (IBP) 注意到了营养物质循环的研究, 1994 年国际土壤学会专门讨论了养分循环和土壤生产力 (ISSS, 1994), 这是因为养分循环和平衡关系着人类最大的两大课题, 粮食和环境。目前国内以农业生态系统为单位进行养分循环的研究比较多, 如钟功甫 (1985) 对桑基鱼塘生态系统物质循环的研究; 何电源 (1991) 标记水稻和绿肥研究了稻田土壤—作物—家畜系统中氮素的循环; 胡胜春 (1992) 对密云县农业生态系统中氮素的循环; 陈士平 (1988, 1990) 等用动态模拟的方法研究了前查干村氮循环的规律。就人工草地生态系统而言, 草地养分平衡状况一方面从根本上决定着土壤肥力的发展方向, 而土壤肥力又是草业持续发展最基本的物质基础; 另一方面, 人们愈来愈重视草地生态系统养分循环和平衡对人类生活环境的影响, 比如草地养分以及某些化合物的循环去向, 关系着草地土壤的退化, 也直接决定着施肥的效果。有关草地生态系统中土壤氮素的研究是很多的, 包括氮的分解矿化作用和矿化固定作用, 硝化作用及反硝化作用, 氮的吸收与挥发等等。由于氮和它的气态化合物是挥发性的, 它的固体化合物在水中的溶解度很高, 所以氮素循环是高度动态的。A. LAZENBY 曾提出草地上播种豆科牧草可以成为禾草草地获取氮肥的源泉, 以代替氮肥是可行的, 他还研究了草地生态系统中氮的输出, 主要流失途径, 这为建立草地生态系统中土壤氮素移动的数学模型提供了有益的资料。由于磷素在生命活动中的重要性, 对生态系统磷素循环的研究, 很早就引起了研究者的重视。但是草地的粗放管理, 使

得草地生态系统磷素研究复杂化。傅林谦曾从磷素牧草形式的输出,磷素在土壤中的淋失以及磷素循环进行了研究<sup>[18]</sup>。胡自治等曾对磷在高山禾草—嵩草型草地(7~10月)中的循环进行了研究<sup>[19]</sup>。其它方面的研究包括张小川曾运用分室模型提出计算草原生态系统养分循环的公式,公式涉及到系统中地上植物活体、立枯、残落物、地下活根、死根和土壤库6个库<sup>[20]</sup>。杜占池对红三叶人工草地土壤和植物营养元素含量特征进行的研究<sup>[21]</sup>。但是就人工草地放牧生态系统而言,其营养物质的循环,不仅在土壤和植物之间进行,同时更主要的是涉及到草地次级生产者家畜这一环节。草地管理的本质就是使植物的生长量,饲草的消费量以及家畜的生产量这3个主要阶段的主要效率之间达到有效平衡。蒋文兰曾指出影响这3个主要阶段的效率之间的有效平衡的关键因素是载畜量、家畜摄入量、家畜繁殖,牧草生长和放牧管理。事实上这5个因素也是影响草地家畜系统中养分循环速率和支出收入平衡的5个关键因素。由P素循环模式图(图1)可以看到,草地牧草吸收量和残落物归还量的水平是调节系统中养分支出和收入的主要杠杆,而家畜摄入量是联络牧草吸收量和残落物归

还量的纽带。在此基础上,提高牧草效率,利用更多牧草以获得高的家畜生产量则需要改变放牧管理措施。而系统养分的盈余和亏损又会指示放牧系统管理措施是否合理,即3个主要阶段之间的效率是否达到平衡。当牧草吸收量大于残落物归还量时,则系统内养分会出现亏损,这就意味着更多的养分输入以及草地的过度利用;而当残留物归还量大于家畜采食量时,又表明一定程度放牧效率的降低。因此,提高草地养分循环速率,最低限度地减少养分损失,最大限度增加系统养分循环,确保充足的施肥量以补充损失量的关键技术措施就是建立合理的人工草地推荐施肥系统,它将通过监测草地土壤的肥力动态变化,家畜的摄食而更好地利用草地现存量,在保证高水平的草地生产条件下,以最少和最低投入而获得系统高产出的目标。

综上所述,人工草地永续利用不能只依靠化肥和能源的投入,还必须研究系统内养分的循环和平衡,只有通过循环,才能使有限的养分得到最大限度地利用,只有了解养分的平衡状况才能对土壤养分水平的发展趋向进行预测,并采取合理的放牧管理措施,从而达到对放牧系统的有效控制。

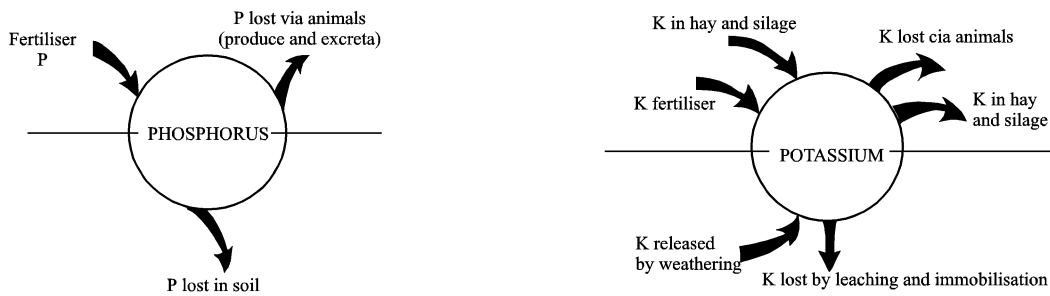


图1 放牧系统磷素和钾素循环模式图

Fig. 1 Mode of circulation of phosphorus and potassium in rangeland ecosystem

#### 4.3 人工草地推荐施肥系统研究进展

推荐施肥是合理施肥的基本环节,也是草业现代化的标志之一。人工草地推荐施肥主要是草场管理者向农民提供施肥的建议。这些建议包括:(1)草地牧草应施多少肥料(按养分计),即肥料用量。(2)选用什么肥料品种。(3)什么肥料用什么方法施用。(4)什么时候施用等。而制定“标准”施肥方案需要以下数据,(1)农民设定的目标载畜量;(2)草场放牧管理制度包括放牧时间,家畜种类及组合等;(3)本地区草地养分平衡状况及有关参考

数据;(4)本地区主要牧草(最大或经济)施肥量的多年试验数据;(5)本地区土壤养分数据以及土壤有效养分数据;(6)不同肥料施用技术及其效果的数据;(7)气候条件(气温、雨量、灾害天气等)数据;(8)不同牧草的土壤和植株诊断(包括临界值)数据,等等。我国推荐施肥研究真正在全国范围内开展系统研究和应用,大体上是在20世纪70年代中期以后,大量的研究工作在农田系统中展开,在提高可靠性,简化推荐技术,应用新技术等方面都取得了显著进步<sup>[19~20]</sup>。随着计算机深入到科技生

活的各个领域,在推荐施肥中应用计算机成为近年推荐施肥研究的新趋势。这方面例子有联合国粮农组织介绍的包括土壤植物多种参数的计算机系统,国内 20 世纪 90 年代初开展的大面积经济施肥推荐计算机专家系统和近年开展的称作“综合推荐施肥系统”等<sup>[22~25]</sup>。

人工草地推荐施肥研究国外开展的时间比较早,其中尤以新西兰的工作最为突出。早在 20 世纪 80 年代,新西兰的草地专家以 P、K 和 S 在草地系统中的循环特点为基础,提出了一系列草地元素循环模式图(图 1),这些工作成为后来各地建立肥料推荐方案的基础(cornforth and sinclair,1984)。新西兰早期的施肥推荐方案不是以肥料的经济施肥量为目标,而是确保农场主获得当季草畜动态平衡的管理目标,其结果是导致土壤磷素的耗竭。SINCLAIR and RODRIGUEZ(1993)在施磷研究中引入了最佳经济施肥量概念,基于这个概念的经济施肥模型克服了原有磷肥施肥模型所引发的低载畜量,低的草地相对产量及低水平的维持施肥量。MECALL 和 THORROLD(1994)的研究证实了此模型的合理性。今天,新西兰人工草地施肥模型是在养分物质循环的基础上,结合土壤肥力动态变化及草地生产管理目标而建立的动态预测系统,它为新西兰畜牧业的科学发展起到了积极的指导作用。综上所述,人工草地永续利用不能只依靠化肥和能源的投入,还必须研究系统内养分的循环和平衡,只有通过循环,才能使有限的养分得到最大限度地利用,只有建立完善的推荐施肥系统,才能达到对草地生产系统的有效控制,真正实现南方草地畜牧业的持续发展。

#### [参考文献]

- [1] 蔡蔚祺. 草地农业系统中的土壤研究[J]. 草原生态系统研究, 1983, (3): 177 - 185.
- [2] 陈佐忠, 黄德华. 内蒙古草原植物的营养元素特征[M]. 植物生态学研究, 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 孔令韶. 新疆宁图壁种牛场地区优势植物, H, Na, Ca, Mg, S 的含量特区及数量分析[J]. 植物学报, 1994, 36(8): 627 - 635.
- [4] 莫大伦. 海南岛 86 种植物化学成份特点及元素间的关系研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(1): 51 - 62.
- [5] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [6] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [7] 李敏通. 我国南方草地发展潜力与对策, 中国畜牧业发展战略研究[M]. 北京: 1988.
- [8] 徐明岗, 张久权. 红壤丘陵区牧草栽培与利用[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- [9] 李家康, 林葆. 化肥在我国农业生产中的作用和发展[A]. 见: 肥料与农业发展国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 1996. 1 - 55.
- [10] 曾宪坤. “九五”磷复肥工业展望[J]. 磷肥与复肥, 1996, (1): 1 - 13.
- [11] 赵俊权, 李淑安. 氮磷钾对非洲狗尾草及纲罗克种子产量和干物质的影响[J]. 草业科学, 1991, 8(2): 64 - 68.
- [12] MICHALK DL, 黄志凯. 地三叶在亚热带酸性瘦瘠对石灰、镁和硼的反应[J]. 草业科学, 1992, 9(6): 43 - 27.
- [13] 谭红, 何锦林, 罗茨华. 牧地石灰对白三叶养分影响研究[J]. 草业科学, 1994, 11(1): 12 - 14.
- [14] 黄必志, 和占星. 温带人工草地经济施用钾肥研究[J]. 草业科学, 1992, 9(3): 12 - 13.
- [15] 林洁荣, 苏水金. 人工草地施肥试验[J]. 草业科学, 1991, 8(5): 46 - 49.
- [16] 曹凑贵, 张光远, 王运华. 农业生态环境养分循环研究概况[J]. 生态学杂志, 1998, 17(4): 26 - 32.
- [17] 陆允甫, 吕晓男. 中国测土施肥的进展和展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 241 - 251.
- [18] 傅林谦, 祝延成. 羊草草地土壤生态系统磷素转化与循环规律的研究[J]. 草地学报, 1994, 3(2): 1 - 8.
- [19] 陈亚明, 吴自立. 高山禾草—嵩草型草地的磷循环[J]. 草业学报, 1995, 4(2): 75 - 80.
- [20] 杜占池. 红三叶人工草地营养元素的生物循环[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 149 - 156.
- [21] 李西开. 农业持续发展中的土壤——植物测试与施肥建议[A]. 中国土壤学会编. 土壤科学与农业持续发展[C]. 中国科技出版社, 1995. 202 - 210.
- [22] 张宜春. 植物营养与作物高产推荐施肥[A]. 国际肥料与农业发展会议论文集[C]. 北京, 1996.
- [23] KAFKAFI V et al. . Fertilization decision model—A synthesis of soil and plant parameters in a computerized program[J]. FAO Soils Bull. 1978, 37: 11 - 30, Rome.
- [24] 刘光崧. 大面积经济施肥的建模与施肥推荐研究[J]. 土壤, 1991, 23(2): 61 - 68.
- [25] 杨卓亚, 毛达如. 综合推荐施肥系统(IFRS)的构建[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(增刊): 12 - 26.