

黄土高原主要草本植物化学元素含量 及其聚类分析研究

穆兴民 贾恒义 程浦海 程积民 雍绍萍 彭祥林

(中国科学院西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

摘要 本文以黄土高原 68 个主要草本植物植株中 N、P、K、Ca、Mg 元素含量测定结果为基础,分析了该区草本植物这 5 种元素含量的特征及其元素间的相互效应,同时又以各元素含量对 68 个草本样品进行了聚类分析。

关键词 草本植物 化学元素 聚类分析

A preliminary study on the content of chemical elements and their similarity analysis for major herbs in the Loess Plateau

Mu Xingmin Jia Hengyi Cheng Puhai Cheng Jimin Yong Shaoping Peng Xianglin

(Northwestern Institute of Soil and water conservation, Academia of Sinica
and Ministry of Water Resources, YangLing, Shaanxi, 712100)

Abstract On the basis of contents of N、P、K、Ca and Mg for 68 principad herbs in the loess plateau, the characteristic element contents the positive and negative effect between five elements, and similarity analysis of herbs have been studied in present paper.

Key words herb chemical element similarity analysis

1 引言

植物通过光合作用积累碳水化合物的同时亦必须由根系从土壤中吸收土壤中的 N、P、K 等几十种化学元素在体内合成蛋白质、纤维素、醣等各种营养物质。牧草的 N 素和各种矿物元素含量的高低是关系草地建设和利用的重要指标;亦是定量研究草地土壤生态系统物质循环的基本

参数;通过施肥—养分吸收—产草量关系分析^{[1][2][3]},可有效的指导草地施肥,以提高肥料有效性,故草本植物体内各化学元素的含量已为人们所重视,而在黄土高原关于草本植物各化学元素含量的系统测试分析报导甚少。

每一植物有其特有的元素含量与分布特征,但不同草本植物间的元素含量亦存在某种程度的相似性,从而使以草本植物元素含量的分析对植物进行聚类研究成为可能。本文对黄土高原主要草本植物的 68 个植株样品茎、叶的 N、P、K、Ca、Mg 等 5 个元素的含量与分布特征作以分析,并以这些元素含量为指标,进行初步聚类研究。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

样品分别采集于 1991 年 9 月与 1992 年 6 月,主要分布于黄土高原的黄土丘陵区。植物名称如表 1。

表 1 黄土高原的 68 个草本植物名录

序号	学名	中国名	序号	学名	中国名
1	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	35	<i>Pupleurum angustissimum</i>	柴胡
2	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	36	<i>leontopodium lenotopodioides</i>	火絨草
3	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	37	<i>Potentilla oninensis</i>	中华委陵菜
4	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	38	<i>Heteropappus altaicus</i>	狗碗花
5	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	39	<i>Rubia cordifolia</i>	茜草
6	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	40	<i>Lespldeza sp</i>	牛梭子
7	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	41	<i>Scutellaria baicalensis</i>	黄芪
8	<i>Medicago sativa</i>	苜蓿	42	<i>Anemone Vitifolia</i>	野棉花
9	<i>Astragalus adsurgens</i>	沙打旺	43	<i>Scutellaria viscidifolia</i>	粗叶黄芪
10	<i>Astragalus adsurgens</i>	沙打旺	44	<i>Plantago asiatica</i>	大车前
11	<i>Astragalus adsurgens</i>	沙打旺	45	<i>Saussurea japonica</i>	风毛菊
12	<i>Vicia amoxena Fisch</i>	野豌豆	46	<i>Glycyrrhiza uralensis</i>	甘草
13	<i>Astragalus melilotoides</i>	草木樨	47	<i>Poa pratensis</i>	早熟禾
14	<i>Astragalus adsurgens</i>	沙打旺	48	<i>Leontopodium lenotopodioides</i>	火絨草
15	<i>Glycine max(L) Merrill</i>	黑豆	49	<i>Artemisia argyi</i>	艾蒿
16		达乌里胡枝子	50	<i>Anemone vitifolia</i>	野棉花
17	<i>Astragalus melilotoides</i>	草木樨黄芪	51	<i>Potentilla chinensis</i>	中华委陵草
18	<i>Artemisia sphaerocephala</i>	沙蒿	52	<i>Rubus palmatus</i>	悬钩子
19	<i>Panicum miliaceum</i>	糜子	53	<i>Heteropappus altaicus</i>	狗碗花
20	<i>Agriophyllum aquarrosum</i>	棉蓬	54	<i>Potentilla bifurca</i>	二裂委陵茶
21	<i>Fagopyrum sagittatum</i>	荞麦	55	<i>Dendranthema chanetii</i>	小红菊
22	<i>Agriophyllum aquarrosum</i>	沙蓬	56	<i>Themeda triandra</i>	黄背草
23		牛心木	57	<i>Bothriochlor ischaemum</i>	白羊草
24	<i>Artemisia argyi</i>	艾蒿	58	<i>Phragmites communis</i>	芦苇
25	<i>Artemisia capillari</i>	茵陈蒿	59	<i>Themeda triandra</i>	黄背草
26	<i>Artemisia argyi</i>	艾蒿	60	<i>Stipa buncana</i>	长芒草
27	<i>Artemisia argyi</i>	艾蒿	61	<i>Stipa buncana</i>	长芒草
28	<i>Artemisia sacrorum</i>	铁杆蒿	62	<i>Stipa buncana</i>	长芒草
29	<i>Artemisia sacrorum</i>	铁杆蒿	63	<i>Thymus mongolicus</i>	百里香
30	<i>Anurolepidium dasystachys</i>	赖草	64	<i>Thymus mongolicus</i>	百里香
31	<i>Eragrostis pilosa</i>	画眉草	65	"	"
32	<i>Phragmites communis</i>	芦草	66	<i>Potentilla chinensis</i>	中华委陵菜
33	<i>Bsameehloa mongolica</i>	沙竹	67	<i>Anemone vitifolia</i>	野棉花
34	<i>Lespedeza hedysaroides</i>	尖叶铁扫帚	68	<i>Anemone vitifolia</i>	野棉花

* 本表列出的有几个同一植物样品,系采集地点不同。

2.2 分析方法

样品消煮采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法^[4],元素含量分析,氮用凯氏法,磷用钼锑比色法^[4],钾、钙、镁用 Ziss(Ⅲ型)火焰光度计法。

2.3 聚类方法

本文采用最大距离法进行聚类。距离系数为欧氏距离。计算欧氏距离时首先对原始数据进行正规化处理。

数据正规化计算式:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}}$$

式中, X'_{ij} 为第 i 个变量(样品)的第 i 个矿物元素的含量 X_{ij} 经正规化后的值; X_{jmin} 和 X_{jmax} 为 i 个样品各元素含量的最小值和最大值。数据正规化后, X'_{ij} 变化于 0~1 之间。

其次计算分类统计量—欧氏距离(Euclidean Distance), 即:

$$D_{ij} = \left[\sum_{k=1}^m (X'_{jk} - X'_{ik})^2 \right]^{1/2}$$

式中 D_{ij} 表示第 i 个样品与第 j 个样品间的欧氏距离, X'_{jk} , X'_{ik} 为各样品的元素含量的正规化值。 m 为指标(即化学元素)5 个数, 本文取 $m = 5$ 。

最后根据距离系数进行聚类分析。

3 结果分析

3.1 黄土高原主要草本植物化学元素含量特征

黄土高原 68 个植株样品叶、茎的 N、P、C、Mg 及 K 的平均含量(g/kg 干物质, 下同)、种间变异系数、元素含量间相关系数等如表 2 及表 3。

表 2 叶的各化学元素平均含量及其相关系数

项 目	N	P	K	Ca	Mg	
元素间相关系数	N	1	0.210	-0.112	0.273	-0.030
	P		1	0.120	0.147	0.183
	K			1	-0.370**	-0.104
	Ca				1	0.026
	Mg					1
元素平均含量(g/kg)	25.57	2.04	17.91	10.69	2.23	
种间变异系数 C.V.(%)	36.7	35.0	45.6	72.6	73.1	
极 差(g/kg)	44.57	3.27	33.48	40.00	3.50	
最高含量(g/kg)	54.49	3.94	40.72	41.64	13.24	
植 物	车前	牛心卜	狗碗花		沙蒿	
最低含量(g/kg)	9.92	0.67	7.24	1.64	0.65	
植 物	沙蒿	糠草	牛心卜	茜草	沙竹	

** 达 0.01 信度水平。

表 3 茎的各化学元素平均含量及其相关系数

项 目	N	P	K	Ca	Mg	
元素间相关系数	N	1	0.553***	-0.008	-0.201	0.293
	P		1	0.281	-0.029	0.165
	K			1	-0.109	-0.251
	Ca				1	0.558***
	Mg					1
元素平均含量(g/kg)	12.37	1.09	15.84	5.06	1.48	
种间变异系数 C.V.(%)	46.2	48.6	42.1	98.6	81.3	
极 差(g/kg)	23.16	2.20	27.31	12.44	7.08	
最高含量(g/kg)	26.63	2.90	31.92	12.91	7.23	
植 物	车前	苜蓿 5	棉蓬	苜蓿 5	茵陈蒿	
最低含量(g/kg)	3.02	0.25	4.62	0.47	0.15	
植 物	芦草	百里香	长芒草	芦草	悬钩	

*** 达 0.001 信度水平。

3.1.1 元素含量水平及种间差异 由表 2 可知,叶片各化学元素平均含量变化于 2.04—25.57(g/kg)之间,以 N 含量最高,P 含量最低,其元素含量依 N—K—Ca—P 次序依次降低。元素含量种间差异,按变异系数,N、P 较小(35%)、Ca、Mg 较大(高达 73%),其大小次序为 Mg>K>N>P。就极差而言,N、Ca 最大,P、Mg 最小。最高与最低含量植物相比,其元素含量相差 5—25 倍。

茎的各化学元素含量特征如表 2。各元素平均含量变化于 1.09~15.84 之间,以 K 的平均量最高,P 的平均含量最低,其元素含量高低次序为:K(15.84g/kg)>N(12.37g/kg)>Ca(5.06g/kg)>Mg(1.48g/kg)>P(1.09g/kg)。种间差异,其变异系数为 K(42.1g/kg)<N(46.2g/kg)<P(48.6g/kg)<Mg(81.3g/kg)<Ca(98.6g/kg);最低含量与最高含量之比,Mg(48.2g/kg)>Ca(27.5g/kg)>P(11.6g/kg)>N(8.8g/kg)>K(6.9g/kg),即最高含量是最低含量的 7 到 48 倍,表明茎的元素含量种间差异比叶的元素含量种间差异显著。

3.1.2 元素间的协同性与互斥性 表 2 中叶的各元素间的相关系数只有 K—Ca 间负相关系数达 0.01 信度显著水平(t—检验),我们称二者具有互斥性,即随某一元素含量(吸收量)的增加而另一元素含量(吸收量)减少。除此之外,叶内各化学元素含量相关系数很小,这与各元素与植物的生理生化特性、草本植物的吸收利用或吸收淋失有关,如钾离子易动性很强,其一是存在于植物体内,即从老叶向亲新叶或生长点转移,其二易因降水而淋失叶较茎的分布面积大,降水对其淋失作用亦较大。

茎的各化学元素含量(吸收量)间的相关系数(表 3)表明:N—P、Ca—Mg 间相关系数性均达 0.001 信度(t—检验)的极显著水平,它们之间均呈正相关,我们称它们之间有协同性,即某一元素的吸收与积累随另一元素吸收的增加而增加。Ca—Mg 元素间的这种协同性与钟海民研究高寒草甸植物的结论一致^[5]。

3.1.3 不同地区植物元素含量比较 黄土高原不同植株地上部各元素含量平均变化于 3—20g/kg 之间(表 4),以 N 素量最高,K 素次之,P、Mg 最低。各元素在叶、茎内的分布亦有较大差异,如 Ca 含量的叶茎比达 2.11,而 K 素仅 1.13。由此可知,与茎相比,叶内富含 Ca 和 N,而 K 的叶茎含量相近。

表 4 植株元素平均含量及元素含量的叶茎比

项 目	N	P	K	Ca	Mg
地上部平均含量(g/kg)	18.97	1.50	16.88	7.88	1.86
元素含量的叶茎比	2.07	1.77	1.13	2.11	1.51

黄土高原 68 种草木植物样品元素含量与我国其它地区及全世界陆地植物含量比较如表 5。

表 5 黄土高原草本植物元素含量与其它区比较

地 区	N	P	K	Ca	Mg	资料来源
黄土高原区	18.97	1.50	16.88	7.88	1.86	本 文
内 蒙 古	23.89	1.51	21.00	21.54	—	陈佐忠等 ^[6]
海南岛				8.7	4.0	莫大伦等 ^[7]
平均	20	2	10	10	2	
全球范围	10—50	1—8	5—50	5—50	1—10	W. 拉夏埃尔 ^[8]

与黄土高原毗邻的内蒙古呼伦贝尔草原相比,黄土高原草本植物 Ca 的含量明显低于内蒙古,N、K 含量亦低 20%左右。与青海高寒草甸植物的 Ca(7.8/kg)、Mg(1.7)^[5]相比,两地其本接近;与全球陆生植物元素含量相比,除 K 略高外,其余元素均略低与全球平均值。

3.2 以化学元素含量为基础的草本植物聚类分析

上述分析表明:黄土高原的草本植物叶、茎的大量元素含量的分布是不均衡的,同时叶、茎的不同元素含量的种间差异亦是很显著的,如叶,Ca含量的种间差异高达99%,为此,以叶、茎内大量元素含量为参数对黄土高原主要草本植物进行聚类分析。

3.2.1 聚类指标与命名 以欧氏距离系数大小及其经验确定聚类临界欧氏距离,进行类型划分。

据上述类结果,以下述二个指标进行命名。第一个是相对含量(RATIO):

$$RATIO_{ik} = \frac{MC_{ik}}{TM} \times 100$$

式中 $RATIO_{ik}$ 为第 k 类第 i 个元素相对含量(%); MC_{ik} 为第 k 类所有植物样品的第 i 个元素平均含量(g/kg); TM 为某器官所有植物样品大量元素的总平均含量(g/kg)。该指标反映了植物体内各元素含量所占比重。

其次是某一元素含量种间差比(DR):

$$DR_{ik} = \frac{MC_{ik} - TMC_i}{TMC_i} \times 100$$

式中 DR_{ik} 为第 k 类第 i 个元素含量种间差比(%); TMC_i 为某器官第 i 个化学元素所有植物样品总平均含量(g/kg)。它反映了植物体内某一元素含量的种间差异,对元素含量作纵向比较。

聚类结果命名原则:以类内 RATIO 最高值确定类名,再以 DR 的最高与最低值定型名。指标临界值及命名如下:

RATIO: 极富₇₀ 富₅₀ 高₃₀ 中₁₀ 低₀
 DR: 极富₁₀₀ 富₆₀ 高₂₀ 中₋₂₀ 低₋₆₀ 微₋₁₀₀ 极微

如某类各元素的 RATIO 最高值(Ca)62%,它为 $70 \geq RATIO > 50$ 范围,即属 70 富 50 类,则该类定义为富 Ca 类,其余类推。

3.2.2 以叶内元素含量为参数的聚类 按上述方法,以叶的 N、P、K、Ca、Mg 的含量为参数,对黄土高原 68 个主要草本植物的聚类结果如图 1、表 6、表 7。以欧氏距离 2.3 为临界值,将 68 个样品分为六大类,图 1 为聚类树形图。由表 5 可知,黄土高原主要草本植物的叶以 N 及 K 类为主,尤以 N 类植物种最多,其次为 Ca 类植物。

表 6 资料表明在各类型内植物元素含量种间差异已明显降低,如 Mg 含量的各类型的变异系数变化于 9%—45%,而整个样品的变异高达 73%。各类型之间,某些元素含量差异显著。表明聚类是有一定可信度的。

表 6 以叶片元素含量为参数的草本植物聚类结果

类	型	代码	植物序号(见附表 1)
过渡组	富 N 类	高 Mg 低水型	I 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,17,21
N 组	极富 N 类	低 Ca 型	IV 37,44
	高 N 类	高 Ca 型	V ₁ 15,16,35,40,42,47,60
过渡组	叫 NK 均衡类	高 P 型	V ₂ 22,19,26,30,31,32,33,34,36,41,65, 43,50,51,54,56,57,59,61,63,64,66,68
K 组	富 K 类	高 N 型	II 12,24,25,27,28,29,38,39,45,46,48,49,52,53,55,58,62,67
	高 K 类	极富 Mg 型	VI 18
过渡组	高 KCa 均衡类	极富 P 型	I 20,23

表7 各类型元素含量特征

代 码	项 目	各元素的统计特征值					
		N	P	K	Ca	Mg	合计
I	平均含量(g/kg)	31.963	2.04	11.01	22.77	3.09	70.87
	变 率(c.v.%)	20	17	20	25	20	—
	占类型合计(%)	39.3	2.5	13.5	28.0	3.8	100
IV	平均含量(g/kg)	54.435	2.21	15.47	6.96	2.25	81.33
	变 率(c.v.%)	0	21	12	30	34	—
	占类型合计(%)	66.7	2.7	19.0	8.6	2.8	100
V ₁	平均含量(g/kg)	29.924	1.54	18.41	5.86	2.07	57.80
	变 率(c.v.%)	20	19	52	80	45	—
	占类型合计(%)	51.8	2.7	31.9	10.1	3.6	100
V ₂	平均含量(g/kg)	18.166	1.50	16.83	6.50	1.68	44.67
	变 率(c.v.%)	16	22	16	41	35	—
	占类型合计(%)	40.7	3.4	37.7	14.6	3.8	100
II	平均含量(g/kg)	26.799	2.25	26.81	5.91	1.52	63.29
	变 率(c.v.%)	19	17	19	38	40	—
	占类型合计(%)	42.3	3.6	42.4	9.3	2.4	100
VI	平均含量(g/kg)	9.92	2.20	21.99	6.31	13.24	53.66
	变 率(c.v.%)	—	—	—	—	—	—
	占类型合计(%)	18.5	4.1	41.0	11.8	24.7	100
I	平均含量(g/kg)	15.260	3.85	21.24	18.23	3.69	62.27
	变 率(c.v.%)	21	13	36	36	9	—
	占类型合计(%)	24.5	6.2	49.1	42.1	5.9	100

* 代码与图1中所注相同。

3.2.3 以茎的元素含量为参数的草本植物的聚类 以欧氏距离系数2.3为临界值可将黄土高原主要草本植物的68个植株样品分为7类。聚类之树形图如图2,分类结果及有关统计特征值如表8及表9。

由表7知,黄土高原主要草本植物茎的元素含量以K类植物为主。表8的统计分析表明主要元素含量的类型间差异显著,如极富Ca类其Ca的含量高达35.39g/kg占该类型五种元素总量的60%以上,而其它各类型Ca的含量不足15g/kg,大部分在10g/kg以下,占五种元素含量的10%—22%。类型内各元素含量的种间差异明显减小。如总样品Ca含量变异高达99%,而聚类之后各类内Ca的种间变异系数变化于25%—75%之间。

表8 以茎的各化学元素含量为参数的草本植物聚类结果

类 型	代 码
Ca组 极富Ca类	I 21
N组 富N类	II 5
过渡组 高N类	VI 1,2,4,6,7,8,15,43
过渡组 高NK均衡类	III 3,9,10,11,12,14,23,31,35,37,42,44,47,52,55
K组 富K类	IV 20,28,38,39,45,46,48,49,51,53,54,57,58,59,65
K组 高K类	V ₁ 19,24,26,27,29,34,36,50,56,61,66,67,68
K组 高K类	VI 25
K组 中K类	V ₂ 13,16,17,18,22,30,32,33,40,41,60,62,63,64

表9 茎各元素含量分类统计特征

代码	各元素的统计特征值						
	项 目	N	P	K	Ca	Mg	合计
I	平均含量(g/kg)	8.49	0.28	10.96	35.39	3.11	58.23
	变 率(c.v.%)	—	—	—	—	—	—
	占类型合计(%)	14.6	0.5	18.8	60.8	5.3	100
II	平均含量(g/kg)	31.52	2.90	14.81	12.91	4.76	66.90
	变 率(c.v.%)	—	—	—	—	—	—
	占类型合计(%)	47.1	4.3	22.1	19.3	7.1	100
VI	平均含量(g/kg)	17.265	1.00	9.20	8.75	2.88	39.10
	变 率(c.v.%)	22	25	31	25	37	—
	占类型合计(%)	44.2	2.6	23.5	22.4	7.4	100
III	平均含量(g/kg)	17.581	1.37	13.42	4.06	1.47	37.90
	变 率(c.v.%)	24	33	37	40	39	—
	占类型合计(%)	46.4	3.6	35.4	10.7	3.9	100
IV	平均含量(g/kg)	12.247	1.41	25.03	44.13	0.99	44.09
	变 率(c.v.%)	28	38	16	75	62	—
	占类型合计(%)	27.8	3.2	56.8	10.0	2.2	100
V ₁	平均含量(g/kg)	8.548	0.84	18.50	2.90	1.14	31.93
	变 率(c.v.%)	23	27	8	45	56	—
	占类型合计(%)	26.8	2.6	57.9	9.1	6.9	100
VII	平均含量(g/kg)	6.67	0.85	13.16	2.93	7.23	30.84
	变 率(c.v.%)	—	—	—	—	—	—
	占类型合计(%)	21.6	2.8	42.7	9.5	23.4	100
V ₂	平均含量(g/kg)	6.971	0.77	10.53	2.48	0.77	21.52
	变 率(c.v.%)	31	46	33	59	48	—
	占类型合计(%)	32.4	3.6	48.9	11.5	3.6	100

4 结果讨论

以叶的元素含量进行的草本植物聚类分析结果,N类植物以豆科牧草为主,再次就是禾本科和菊科及车前科植物,各类型植物叶内元素N的含量占5种元素含量的1/3以上。富N类植物,N含量达32g/kg,占类型内5种元素总量的39%,这一类型是以优良豆科牧草苜蓿、沙打旺及草木樨为主,它们不仅能为牲畜提供丰富的蛋白质,而且亦能为牲畜补充其生长发育所需的钙质。但这类牧草的磷及钾素含量较低。其次,高N类高Ca型植物以豆科植物如达乌里胡枝子等为主,这类植物的N素及Ca质含量相对较低。但是,含N素最高的植物并不是豆科植物,而是以车前科的大车前为主的极富N类低Ca型,其含N量高达54g/kg以上,占植物叶片内5种元素含量总和的65%左右。不论叶茎,车前是68个植物品中含N最高植物(表1、2)。

在K组植物中,以茼蒿、茵陈蒿等菊科植物为主,还有少量豆科植物如野豌豆、甘草和禾本科植物如芦苇等组成,K的含量占叶片内5种元素总量的30%—45%。从聚类图1上看,如论怎样聚类,沙蒿总是独立成类,它的特别之处在于不仅K的含量极高,高达13.24g/kg(所有68个植物平均仅2.23g/kg)。从表5知道,中NK均衡类高P型植物样品最多,占68个种植物的50%左右。

以茎的元素含量进行的植物样品聚类结果与以叶的元素含量所作聚类有一定相似之处,但

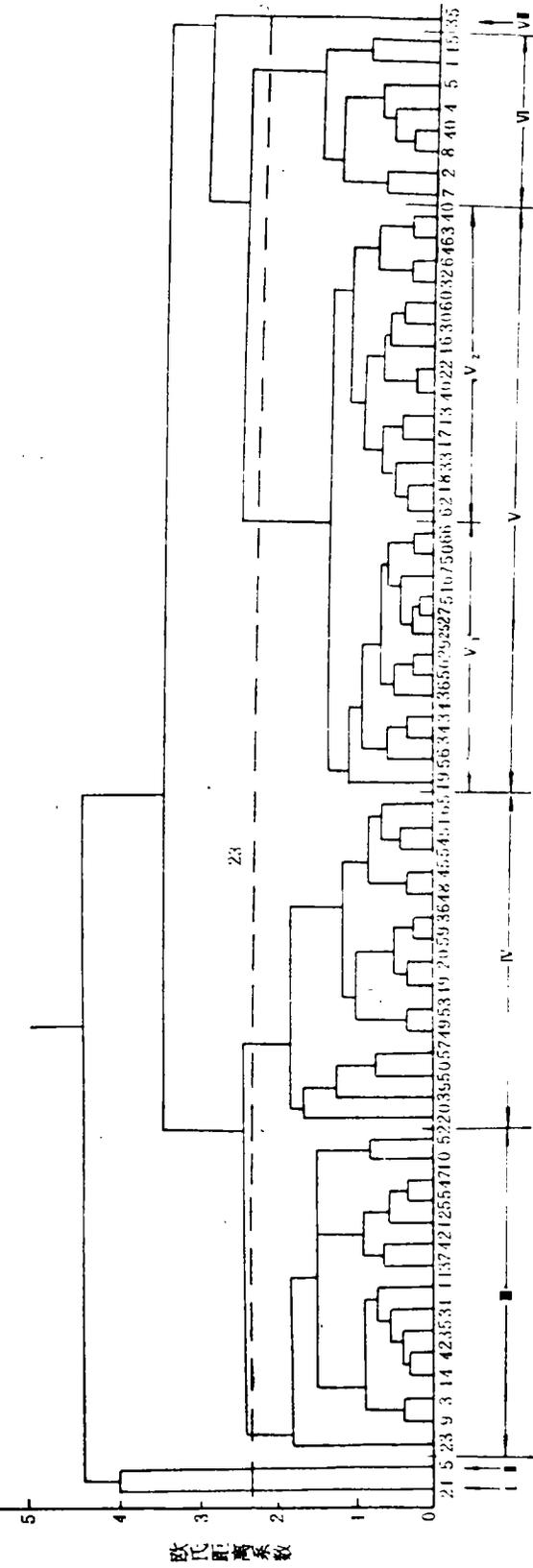


图1 以叶内元素含量为参数的草本植物聚类分析

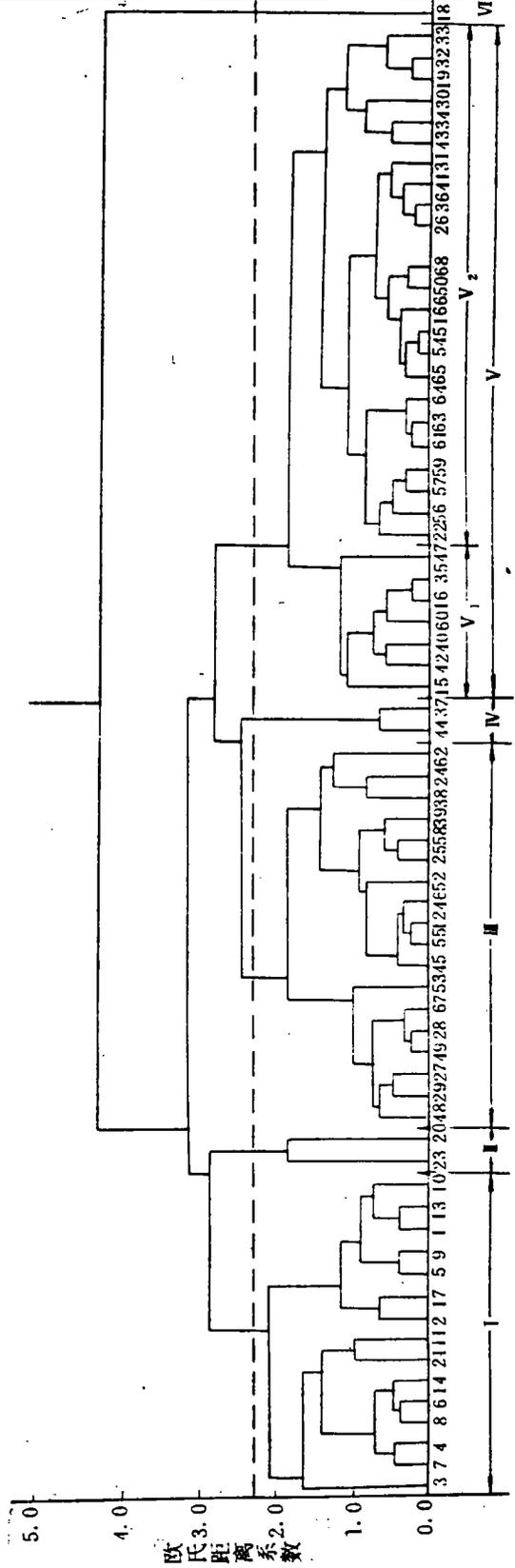


图2 以茎内矿物元素含量为指标的草本植物聚类分析

又不完全吻合。如N组植物仍以豆科植物为主,豆科的首蓿、黑豆为高N类富C、Mg低K型,而沙打旺、紫胡等豆科植物茎秆N、K元素含量占优势,与其他种相比P素含量亦高,但C_d的含量则较低。

从表9可知,黄土高原草本植物茎内K的含量普遍占优势。该组植物样品占68种植物的70%左右。K组植物中以菊科(如艾蒿、铁杆蒿、风毛菊、沙蒿),禾本科(如白羊草、芦苇)等植物为主。

从图2上看,为达分类之目的乔麦、序号为5的首蓿及茵陈蒿等各自成为一类。乔麦茎秆富含C、Mg元素,序号为5的首蓿其各种元素含量都甚高,茵陈蒿茎秆K素含量较高13.16g/kg,但茎内Mg的含量高达7.23g/kg(总体平均1.48g/kg)。

关于这方面研究,一方面前人人工体甚少,另一方面聚类结果会受采样时间(主要指植物发育阶段)、采样地土壤地球化学条件等因素综合影响,研究结果与一般认识稍有差异,今后仍需进一步充实与完善。

参考文献

- 1 Keulen, H. Van 1982. Graphical analysis of Annual crop response to fertilizer application. *Agri. system* 9: 113-126
- 2 Seligman N. G. and Keulen H. Van 1981. 4. 10 PAPAAN: A Simulation model of annual pasture limited by rainfall and nitrogen
- 3 贾恒义等. 沙打旺水肥协同效应研究—水肥协同效应对产量及土壤养分的影响, *中国草地*, 1993, PP35-39
- 4 中国科学院南京土壤研究所. 土壤与植物测定方法, 1989
- 5 钟海民等. 高寒草甸植物化学成份及其相互关系的初步分析. *高寒草甸生态系统*, 1991年(3)
- 6 陈佐忠等. 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*, 科学出版社, 1995, P112-130
- 7 莫大伦等. 海南岛86种植物化学成份特点及元素问题的关系研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1988, (12), 51-62
- 8 拉夏埃尔. W(李博等译). *植物生理生态学*, 科学出版社, 1985, P146