

DOI: 10.11686/cyxb2019079

<http://cyxb.magtech.com.cn>

娄珊宁, 侯扶江, 任继周. 用食物当量评价草地农业的生产力. 草业学报, 2019, 28(12): 1-16.

Lou S N, Hou F J, Ren J Z, *et al.* Evaluation of grassland agricultural productivity by food equivalent unit. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(12): 1-16.

用食物当量评价草地农业的生产力

娄珊宁, 侯扶江*, 任继周

(兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室,
兰州大学中国草业发展战略研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:根据食物当量的概念和模型,通过引入牧草消化率后饲草食物当量计算的能和蛋白质系数,对原始模型进行了修正。以1 kg 苜蓿(标准食部100%,含水量10%,总能14.267 MJ·kg⁻¹,蛋白质含量229 g·kg⁻¹,干物质消化率65.48%)作为标准饲草,计算并比较了天然草地、栽培牧草、青贮饲料与粮食秸秆等草地资源的食物当量,对不同地域、不同空间尺度、不同利用方式的土地资源的生产力进行了统一量纲上的对比。结果表明,我国牧草的饲草食物当量总体在0.2~1.2 FEU·kg⁻¹,其中豆科牧草的饲草食物当量在0.4~1.2 FEU·kg⁻¹,其中能与蛋白兼优、消化率高的银合欢嫩叶为1.2 FEU·kg⁻¹;禾本科牧草的饲草食物当量在0.2~1.0 FEU·kg⁻¹,暖季型牧草多年生黑麦草为1.0 FEU·kg⁻¹;青贮饲草(包括青贮秸秆)的食物当量为0.1~0.7 FEU·kg⁻¹;秸秆的食物当量约为0.2 FEU·kg⁻¹。夏季21个主要天然草地类型(如荒漠草原和高寒草甸)的FEU生产能力为142~2739 FEU·hm⁻²,玛曲的高寒草甸及河北草甸草原约在1300 FEU·hm⁻²以上。FEU作为一种快速、易于计算和解释的牧草、畜牧饲料和饲料作物的饲料价值的测量管理单位,打破了单纯以谷物为粮食的传统食物观,统一了食物的标准,即将各个地域、农业系统、饲草和家畜种类、饲草加工和利用方式的食物按统一的标准计算,可以对居民的饮食结构和区域农业结构起指导作用,可为推动我国农业供给侧改革提供决策依据。

关键词:草地农业生态系统;牧草;青贮;家畜;消化率;代谢能;粗蛋白;饲用价值;草地评价

Evaluation of grassland agricultural productivity by food equivalent unit

LOU Shan-ning, HOU Fu-jiang*, REN Ji-zhou

State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystem, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Chinese Center for Strategic Research of Grassland Agriculture Development, Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: Building on the concept and definition of the Food Equivalent Unit, this paper modifies the original definition by including energy and protein digestibility for calculation of the forage food equivalent unit (FEU). Using 1 kg alfalfa as the forage standard (FEU=1.0 with standard edibility (100%), standard moisture content (10%), total energy (14.267 MJ·kg⁻¹), crude protein (229 g·kg⁻¹ DM), digestible DM (65.48%), feed standard energy and protein factors are derived and, together with digestibility values, used in the model to calculate FEU of other forage types. The FEU is proposed as a measure of the feed value of forage resources such as native grassland, cultivated forage, silage and cereal straw. The results indicate that the average FEU

收稿日期:2019-01-24;改回日期:2019-07-29

基金项目:教育部创新团队(IRT17R50),“973”计划一牧草新品种(系)提高草地生产力的生物学基础(2014CB138706)和国家自然科学基金面上项目一青藏高原高寒草甸灌丛化对家畜生产的作用及其机理(31672472)资助。

作者简介:娄珊宁(1990-),女,安徽蚌埠人,在读博士。E-mail: loushn@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

of all principal forage types in China is in the range of $0.2-1.2 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the FEU of leguminous forage (with good energy and protein content) is between $0.4-1.2 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$. The FEU of *Leucaena chinensis*, of which the leaves have high digestibility, is $1.2 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$; the FEU of grass species ranges from $0.2-1.0 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$, with FEU of perennial ryegrass in the warm season being $1.0 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$, and FEU of silage about $0.1-0.7 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$. The FEU of straw is about $0.2 \text{ FEU} \cdot \text{kg}^{-1}$. The FEU production capacity of 21 major natural grassland types (e.g.: desert steppe and alpine meadow) in summer growing season was calculated to be in the range $142-2739 \text{ FEU} \cdot \text{ha}^{-1}$, with alpine meadow in Maqu, and Hebei's meadow steppe grassland both being above $1300 \text{ FEU} \cdot \text{ha}^{-1}$. The forage FEU has the potential to be used as a quick and easy-to-calculate-and-interpret measure of forage feed value of both arable and pastoral forage and feed crops, and as such, to be a valuable management tool in the selection of forage crops for livestock production.

Key words: grassland agro-ecosystem; forage; silage; livestock; digestibility; metabolic energy; crude protein; feed value; grassland evaluation

全世界正在发生食物结构的变革,人均口粮消费减少,动物类食物消费增长^[1]。20世纪80年代以来,我国耗粮型动物生产导致饲料粮占粮食总产的70%左右,需求持续增长,这是食品安全的主要压力^[1-3],因此,传统的“耕地农业”向“草地农业”转变^[2]。一般草地农业耕地种草的面积不少于1/4,动物生产占农业产值1/2以上,这是国家发展水平和农业现代化的标志^[4]。发达国家栽培草地与天然草原面积比不少于0.10:1,美国为0.58:1,英国为1.35:1,新西兰为3.57:1;我国仅为0.03:1,加上改良草地也仅为0.05:1^[5]。可见,我国食品安全的威胁来自农田缺草及其导致的农牧系统相悖^[6](discordance of crop & livestock production system, CLPD),根本原因之一是缺少衡量耕地、草地、林地、水域等食物生产系统的方法和指标,难以向决策者和生产者提供定量的依据。

国内外关于草地农业生产力的研究,直接测定牧草和畜产品产量,包括草地的生物产量、经济产量和营养成分产量,家畜的畜产品单位等^[7-13];或间接地通过体内和体外代谢、家畜饲喂和放牧等试验测定植物生产向动物生产的转化率^[14-19],以及经验模型等;无一例外地把能量和蛋白质作为重要的指标,既体现了食物的能量价值,又反映了其品质。这些方法常常局限于植物生产或动物生产,牧草之间难以比较、草畜之间缺乏联系^[20]。食物当量(food equivalent unit, FEU)以热量和蛋白质为基础,为各种植物性和动物性食物提供了统一的评价工具^[20-21]。然而,当时缺少统一、准确的牧草转化效率的数据,食物当量没有考虑植物消化率在物种、品种、加工方式、利用方式等以及草畜互作之间的差异,植物与动物的转换系数沿用生态系统能量金字塔1:10的转化效率^[20]。近20年来,国内外开展了大量的草畜互作试验^[14,18,22-25],为完善食物当量的计算提供了一些关键参数。与此同时,草地农业保障食品安全逐渐成为社会现实,草地、农田、林地、水域等共同构建了全球食品安全和生态安全一体化的保障机制,食物当量作为评价食物生产能力的指标体系,其计测改进和应用拓展具有紧迫的社会需求。

近年,国家重视“粮改饲”、粮经草三元种植,其实质是农业供给侧改革,核心即传统的耕地农业向草地农业转型,发展粮草畜与生态环境兼顾的农业系统^[26],亟须简便、准确、通用地评价各类土地食物生产水平的度量衡。为此,以食物当量的理论和方法为基础,利用牧草营养价值和消化率等实测数据,改进食物当量的测算,以体现牧草品种与产品形态、草畜互作方式与类型、土地利用类型与管理模式等各个尺度的差异性,为草地农业生态系统提供精确的评价工具,推动多尺度的草畜系统耦合,为草地农业保障食品安全和生态安全提供切实可靠的工具。

1 材料与方法

1.1 数据来源

中国饲料数据库(2016年第27版)饲草营养价值数据(<http://www.chinafeeddata.org.cn/>),近年科技期刊

公开发表的部分饲草消化代谢数据,作者在兰州大学环县黄土高原试验站、临泽草地农业试验站、玛曲草地农业试验站等放牧试验中测定的牧草消化代谢数据^[27-29]。牧草品种主要有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、燕麦(*Avena sativa*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、黑麦(*Secale cereale*)、小麦(*Triticum aestivum*)、箭筈豌豆(*Vicia sativa*)、高羊茅(*Festuca elata*)、车前(*Plantago depressa*)、菊苣(*Cichorium intybus*)、红三叶(*Trifolium pratense*)、白三叶(*Trifolium repens*)等,每个品种测试均有 3~5 个重复。

1.2 饲草食物当量的计算

饲草的食物当量(FEU),以饲草的能量和粗蛋白含量及其消化代谢为基础计算^[20]。饲草食物当量根据消化率修正,排除产气和产热的能量消耗,直观地表达了饲草的动物食物生产的价值。本研究使用的饲草消化率,主要通过代谢仓、代谢架测定,也有体内法或体外法测定^[29-30]。

$$\text{FEU} = H \times C_H + P \times C_P \quad (1)$$

式中: H 为食物的能量, P 为食物的蛋白质含量, C_H 和 C_P 分别为能量系数和蛋白质系数^[20]。

以往,稻米(*Oryza sativa*)作为标准的植物性食物,在“猪—粮型”的耕地农业中占主流^[3];能量和蛋白质含量分别为 $14.267 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的稻米为 1 个食物当量^[20]。我国等发展中国家,草地农业系统没有得到充分发展,长期缺少优质牧草,动物生产依赖劣质饲草,重在吃“饱”,而非吃好,这是历史的局限性,食物当量的测算重视食物的能量价值,粗略地规定能量权重占 90%,蛋白质占 10%^[20]。随着社会发展,饲草品质成为动物生产的根本保证^[31-32],为此将饲草食物当量中能量和蛋白质的权重调整为 1:1,并重视饲草的消化性能。相应地,食物当量的计算公式调整为:

$$\text{FEU} = H \times D_H \times C_H + P \times D_P \times C_P \quad (2)$$

式中: D_H 和 D_P 分别为能量和蛋白质的消化率(digestibility of energy and crude protein, %DM)。

紫花苜蓿是全世界种植面积最大的多年生豆科牧草之一^[29],品质优异,被誉为“牧草之王”。以初花期的紫花苜蓿作为标准饲草(表 1),规定其标准食部(standard eatable part, ES)100%、标准含水量(standard water content, WS)10%的苜蓿干草 1 kg 为 1 个饲草食物当量,其热值和粗蛋白含量分别为 $18.37 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 和 $229 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$,能量消化率和粗蛋白消化率分别为 64.95%和 74.83%(中国饲料数据库平台, <http://www.chinafeeddata.org.cn/>),消化能和可消化粗蛋白含量分别为 $11.93 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 和 $17.13\% \text{ DM}$ 。苜蓿的食物当量各参数计算按下式,

$$1 = 18.37 \times 64.95 \times C_H + 229 \times 74.83 \times C_P \quad (2)$$

其中, $18.37 \times 64.95 \times C_H = 229 \times 74.83 \times C_P = 0.5$ 。

得出饲草食物当量的能量系数和蛋白质系数: $C_H = 0.042$, $C_P = 0.0029$ 。

将得到的系数代入式(2),计算某种饲草的食物当量(FEU)时,将其能量及其消化率、蛋白质含量及其消化率代入式(3),得出它的食物当量。即

$$\text{FEU} = H \times D_H \times 0.042 + P \times D_P \times 0.0029 \quad (3)$$

不同地区、不同生育期、不同品种、不同加工方式的饲草或其产品除去水分之外的食部不同,可根据含水量校正。即:

$$\text{FEU}' = \text{FEU} [E \times (100 - W)] / [E_s \times (100 - W_s)] \quad (4)$$

其中, FEU' 为校正后的饲草食物当量, E 和 E_s 为实际食部和标准食部, W 为实际含水量, W_s 为标准含水量。

生产中往往多测定干物质消化率(digestibility of dry matter, DMD),简单易行、成本较低,较少测定能量和蛋白质的消化率;两者之间比较好的数量关系,因此食物当量也可根据干物质消化率计算。

$$\text{FEU} = \text{DMD} \times (H \times C_H + P \times C_P) \quad (5)$$

标准牧草苜蓿的干物质消化率平均为 65.48%^[29],将各参数代入式(5)计算食物当量。

$$1 = 65.48 \times (18.37 \times C_H + 229 \times C_P)$$

其中, $18.37 \times 65.48 \times C_H = 229 \times 65.48 \times C_P = 0.5$ 。

得出饲草食物当量的能量系数和蛋白质系数: $C_H=0.042, C_P=0.0033$ 。某饲草的食物当量即:

$$FEU=DMD \times (H \times 0.042 + P \times 0.0033) \quad (6)$$

1.3 动物产品的食物当量

我国草食畜生产以牛、羊为主,牛肉产量是羊肉的 1.56 倍,各个国家大体如此,因此以牛肉作为动物性产品的标准食物,规定其 1 kg(含水量 74.3%)为 1 个食物当量,其能量和蛋白质含量分别为 $5.815 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 和 $196 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 规定能量权重占 50%,蛋白质权重占 50%,得出动物性食物的能量系数和蛋白质系数分别为:

$$C_H=0.086, C_P=0.0026$$

动物性食物的食物当量 (food equivalent unit of animal product, FEU_a) 为:

$$FEU_a=E \times 0.086 + P \times 0.0026 \quad (7)$$

动物性食物与植物性食物之间的换算,根据生态学的能量金字塔定律,过去以 1:10 粗略地换算^[20]。随着家畜消化代谢试验提供越来越多的数据,就将牧草和家畜生产力有机地统一起来。畜产品单位将 1 kg 牛或羊的增重定义为一个畜产品单位,相当于 110.88 MJ 消化能^[33]。1 kg 标准饲草一苜蓿的消化能为 11.93 MJ,二者相差 9.29 倍,饲草食物当量与畜产品食物当量的换算系数为:

$$FEU_a=9.29 \times FEU_f \quad (8)$$

$$FEU=FEU_f \quad (9)$$

$$\text{因此, } FEU_a=9.29 \times FEU \quad (10)$$

其中, FEU_f (forage food equivalent unit) 为饲草的食物当量。

2 结果与分析

2.1 植物生产的食物当量

2.1.1 植物营养体(饲草)的食物当量 食物当量可以比较各品种和类型牧草的饲用价值。16 种豆科牧草的食物当量为 0.4~1.2,多在 0.6~1.0,平均 0.84;17 种多年生禾草的食物当量在 0.2~1.0,平均 0.70,略逊于豆科牧草(表 1);10 种一年生禾草的食物当量变化范围在 0.5~0.8,集中于 0.6~0.7,平均 0.66,低于多年生禾草。7 种作物秸秆的食物当量为 0.2~0.3,平均 0.25,远低于其营养体;其中,3 种作物秸秆青贮后食物当量为 0.1~0.2,平均 0.18(表 1);5 种青贮饲草的食物当量在 0.2~0.7,多集中在 0.2~0.3,平均 0.37,是青贮秸秆的 2 倍以上,表明青贮并不明显改善秸秆的饲用价值。可见,豆科牧草粗蛋白含量和消化率较高,食物当量大于禾草;然而,适宜时期收获的禾草,如多年生黑麦草、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等,其食物当量与豆科牧草相当、甚至略优(表 1)。禾草中,玉米(*Zea mays*)、苏丹草(*Sorghum sudanense*)等暖季型牧草的食物当量一般低于冷季型牧草(表 1)。青贮饲料蛋白含量中等,但干物质含量低,因而食物当量较小(表 1)。

作物秸秆适口性差,粗蛋白含量一般只有 2%~5%(表 1),快速降解部分只有高品质牧草的 1/4^[34],消化率低(表 1),维生素和矿物质等营养物质含量少,虽然能量含量高,但综合评价,其食物当量低。青贮、氨化等加工方式虽然提高了秸秆的饲用价值,但作用有限,食物当量仍小于同类作物的青干草(表 1)。

2.1.2 作物籽实的食物当量 全球超过 1/3 的禾谷类籽实用作精料,其中 40%饲喂反刍家畜,相当于 35 亿人的口粮,发展中国家 70%的谷物作饲料。9 种谷物的食物当量在 0.8~1.2,多在 0.8~0.9(表 2)。作物籽实虽然消化率高,但能量和粗蛋白含量普遍较低(表 2),饲喂草食家畜时生态效率较低(表 3)。

植物的食物当量受利用方式的影响。在甘肃省(表 4),春小麦生产籽实,其食物当量相当于收获干草的 36%。小麦秸秆青贮虽然提高了其营养价值,但由于粗蛋白含量过少,其食物当量远不及收获干草或放牧利用。紫花苜蓿无论是收获干草还是放牧利用食物当量均较高,青贮后提高了消化率和粗蛋白含量。多年生禾草产草量高,品质好,无论是收获干草还是放牧利用,单位面积草地的食物当量产量高。作物青贮利用的食物当量比收获干草稍高,因为青贮可提高消化率,蛋白含量略有增加,干物质发酵损失小。作物放牧利用,不仅食物当量高,而且人工、机械、能源等成本较低,经济效益好。

表 1 饲草食物当量

Table 1 Food equivalent unit of forage

项目	名称	生育期	标准含水量	能量	能量消	粗蛋白含量	粗蛋白	饲草食
Item	Name	Growth	Standard	Energy	化率	Crude	消化率	物当量
		period	water	(MJ ·	Digestibility	protein	Digestibility	FEU
			content	kg ⁻¹ DM)	of energy	(g · kg ⁻¹	of crude	
			(%)		(%DM)	DM)	protein (%DM)	
豆科牧草	紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	初花期 Early flowering	10.00	18.37	64.95	229.00	74.83	1.000
Leguminosae	箭筈豌豆 <i>V. sativa</i>	初花期 Early flowering	6.59	17.65	64.87	165.30	58.68	0.792
	草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	盛花期 Full bloom stage	8.70	18.67	57.91	163.00	57.91	0.739
	毛苕子 <i>Vicia villosa</i>	盛花期 Full bloom stage	6.60	17.24	68.30	231.00	68.30	0.990
	沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	盛花期 Full bloom stage	9.82	18.20	68.72	172.70	68.72	0.872
	小冠花 <i>Coronilla varia</i>	盛花期 Full bloom stage	9.92	18.24	78.00	220.40	78.00	1.099
	百脉根 <i>Lotus corniculatus</i>	盛花期 Full bloom stage	9.85	13.60	58.64	163.00	58.64	0.614
	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i>	盛花期 Full bloom stage	8.40	17.28	54.91	209.50	54.91	0.746
	柱花草 <i>Stylosanthes guianensis</i>	盛花期 Full bloom stage	9.17	16.98	32.73	106.00	61.43	0.427
	黄花苜蓿 <i>Medicago falcata</i>	现蕾期 Squaring stage	6.90	16.53	52.18	261.00	52.18	0.785
	银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i>	嫩叶 Tender leaf	5.15	20.10	71.00	259.00	71.00	1.196
	二色胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	盛花期 Full bloom stage	8.81	18.11	57.62	147.90	57.62	0.695
	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	盛花期 Full bloom stage	3.82	18.90	40.35	266.70	40.35	0.677
	红豆草 <i>Onobrychis viciaefolia</i>	盛花期 Full bloom stage	8.12	16.55	70.45	145.90	65.07	0.782
	白三叶 <i>T. repens</i>	盛花期 Full bloom stage	7.92	16.26	69.68	187.30	85.10	0.962
	红三叶 <i>T. pratense</i>	盛花期 Full bloom stage	9.31	15.38	78.83	204.10	78.83	0.985
多年生禾草	草地早熟禾 <i>P. pratensis</i>	分蘖期 Tillering stage	8.84	19.10	75.68	170.10	75.68	0.994
Perennial	鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i>	拔节期 Jointing stage	7.48	14.01	75.40	121.50	85.10	0.765
grasses	老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	抽穗期 Heading stage	9.86	19.54	67.00	117.00	78.83	0.819
	多年生黑麦草 <i>L. perenne</i>	分蘖期 Tillering stage	9.94	18.50	78.40	187.00	78.40	1.036
	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	抽穗期 Heading stage	9.33	18.38	66.19	227.70	66.19	0.957
	无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	分蘖期 Tillering stage	8.80	19.37	60.46	217.50	64.02	0.909
	扁穗雀麦 <i>Bromus cartharticus</i>	抽穗期 Heading stage	5.80	16.73	55.48	173.00	55.48	0.700
	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	抽穗期 Heading stage	9.71	17.18	54.96	202.30	54.96	0.722
	蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	抽穗期 Heading stage	9.17	18.54	51.18	190.30	13.07	0.475
	沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i>	抽穗期 Heading stage	8.03	17.97	58.43	230.00	15.08	0.553
	猫尾草 <i>Uraria crinita</i>	盛花期 Full bloom stage	5.77	17.80	56.05	74.80	56.08	0.566
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	抽穗期 Heading stage	9.14	17.88	56.84	154.10	56.84	0.688
	高羊茅 <i>F. elata</i>	抽穗期 Heading stage	9.19	17.23	51.20	154.00	51.20	0.605
	偃麦草 <i>Elytrigia repens</i>	分蘖至拔节 Tillering to jointing stage	8.30	18.53	51.21	194.00	54.02	0.717
	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	抽穗期 Heading stage	7.18	19.29	38.76	175.60	37.56	0.522
	弯穗鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	开花期 Flowering stage	8.99	17.32	23.67	101.90	23.67	0.245
	纤毛鹅观草 <i>Roegneria ciliaris</i>	开花期 Flowering stage	7.11	17.53	53.22	101.00	53.22	0.565
一年生禾草	一年生黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	抽穗期 Heading stage	9.01	17.56	67.84	73.90	67.84	0.653
Annual grasses	苏丹草 <i>S. sudanense</i>	孕穗期 Boot stage	9.11	16.03	59.88	153.00	59.50	0.674
	饲用玉米 <i>Z. mays</i> for forage	成熟期 Maturity stage	11.80	12.94	66.56	111.00	66.56	0.565
	玉米(全株) Whole plant of <i>Z. mays</i>	抽穗期 Heading stage	10.06	18.30	65.36	78.00	57.20	0.631

续表 1 Continued Table 1

项目 Item	名称 Name	生育期 Growth period	标准含水量 Standard water content (%)	能量 Energy (MJ • kg ⁻¹ DM)	能量消 化率 Digestibility of energy (%DM)	粗蛋白含量 Crude protein (g • kg ⁻¹ DM)	粗蛋白 消化率 Digestibility of crude protein (%DM)	饲草食 物当量 FEU
一年生禾草 Annual grasses	墨西哥玉米 <i>Purus frumentum</i>	孕穗期 Boot stage	10.00	14.46	66.60	138.00	66.60	0.672
	高粱 <i>Sorghum bicolor</i>	成熟期 Maturity stage	9.30	15.77	82.69	85.00	82.69	0.757
	燕麦 <i>A. sativa</i>	分蘖期 Tillering stage	9.25	17.98	61.50	158.50	60.10	0.748
	黑麦 <i>S. cereale</i>	分蘖期 Tillering stage	8.91	17.88	55.53	121.30	59.01	0.633
	大麦 <i>H. vulgare</i>	抽穗期 Heading stage	9.99	17.05	57.70	109.20	58.80	0.600
	小麦 <i>T. aestivum</i>	抽穗期 Heading stage	7.54	17.10	64.92	113.90	52.15	0.656
作物秸秆 Crop straw	水稻 <i>O. sativa</i>	成熟期 Maturity stage	6.50	14.02	34.20	27.00	34.20	0.237
	玉米 <i>Z. mays</i>	成熟期 Maturity stage	7.00	15.17	30.09	60.00	30.09	0.252
	小麦 <i>T. aestivum</i>	成熟期 Maturity stage	7.10	15.40	30.26	31.00	30.26	0.230
	大麦 <i>H. vulgare</i>	成熟期 Maturity stage	5.50	15.00	34.67	45.00	34.67	0.277
	高粱 <i>S. bicolor</i>	成熟期 Maturity stage	8.79	13.42	30.36	39.00	30.36	0.208
	棉花 <i>Gossypium</i> spp.	成熟期 Maturity stage	6.84	15.40	35.97	49.60	35.00	0.293
	燕麦 <i>A. sativa</i>	成熟期 Maturity stage	5.50	15.00	30.09	35.00	30.09	0.231
青贮秸秆 Silage straw	青贮玉米 <i>Z. mays</i>	成熟期 Maturity stage	60.80	15.20	20.09	73.50	40.09	0.093
	青贮小麦 <i>T. aestivum</i>	乳熟期 Milk stage	73.65	15.99	59.81	121.60	59.81	0.179
	青贮大麦 <i>H. vulgare</i>	蜡熟期 Dough stage	60.93	18.22	59.10	85.70	59.10	0.260
青贮饲草 Silage forage	青贮全株玉米 Whole plant of <i>Z. mays</i>	成熟期 Maturity stage	65.35	17.30	54.84	87.20	54.84	0.207
	青贮苜蓿 <i>M. Sativa</i>	成熟期 Maturity stage	66.30	17.37	53.35	157.00	53.35	0.237
	青贮黑麦草 <i>L. perenne</i>	成熟期 Maturity stage	68.40	18.50	75.20	187.00	76.00	0.350
半干青贮饲草 Semi-dry silage grasses	青贮黑麦草 <i>L. perenne</i>	成熟期 Maturity stage	31.60	16.70	75.20	177.00	75.20	0.695
	青贮芦苇 <i>Phragmites australis</i>	抽穗期 Heading stage	44.51	15.67	65.43	94.90	45.67	0.343

表 2 谷物籽实的食物当量
Table 2 Food equivalent unit of grain

名称 Name	标准含水量 Standard water content (%)	能量 Energy (MJ • kg ⁻¹ DM)	粗蛋白含量 Crude protein (g • kg ⁻¹ DM)	食物 当量 FEU	名称 Name	标准含水量 Standard water content (%)	能量 Energy (MJ • kg ⁻¹ DM)	粗蛋白含量 Crude protein (g • kg ⁻¹ DM)	食物 当量 FEU
稻米 Rice	13.60	14.27	77.00	0.823	小米 Foxtail millet	12.30	14.98	90.00	0.890
大麦 Barley	13.10	12.20	102.00	0.809	燕麦 Oat	11.60	12.71	143.00	0.950
荞麦 Buckwheat	11.00	13.56	93.00	0.840	玉米 Corn	13.40	14.23	81.00	0.833
青稞 Hullessbarley	12.10	12.47	102.00	0.820	豌豆 Vetch	10.40	13.29	215.00	1.184
小麦 Wheat	10.00	13.27	119.00	0.903					

2.1.3 果蔬的食物当量 水果、蔬菜类及其废弃物可用作饲料^[30],尤其在销售、贮运困难时。13 种常见水果的食物当量为 0.06~0.20,集中于 0.05~0.15,平均为 0.12。10 种常食蔬菜的食物当量为 0.05~0.18,多为 0.05~0.10,平均为 0.09。它们含水量高,因而食物当量小(表 5);适宜就地转化,如果干燥,也可作为饲料商品运输、销售。

表 3 主要家畜的料肉比

Table 3 Feed conversion ratios of several livestock

家畜	时期	料肉比 ^[30]	家畜	时期	料肉比 ^[30]
Livestock	Age	Ratio of feed to meat	Livestock	Age	Ratio of feed to meat
仔猪 Piglet	15~20 日龄 15—20 days old	1.50	肉羊 Mutton sheep	10~12 月龄 10—12 months old	6.80
母猪 Sow	哺乳期 Lactation	4.55	肉牛 Beef cattle	10~12 月龄 10—12 months old	6.00~8.00
肉羊 Mutton sheep	1~3 月龄 1—3 months old	4.00			

表 4 甘肃省几种作物不同利用方式的食物当量

Table 4 Food equivalent unit of different utilizations of crops (FEU · hm⁻²)

用途	春小麦 ^[28]	玉米	紫花苜蓿 ^[29]	多年生黑麦草 ^[27]	用途	春小麦 ^[28]	玉米	紫花苜蓿 ^[29]	多年生黑麦草 ^[27]
Utilization	Spring	Corn	Alfalfa	Perennial	Utilization	Spring	Corn	Alfalfa	Perennial
	wheat			ryegrass		wheat			ryegrass
收获籽实 Grain	635	946	—	—	青贮 Silage	1814	1053	3115	3290
收获干草 Hay	1770	—	3108	3005	放牧 Grazing	2250	—	3373	3430
秸秆 Straw	341	675	—	—					

注:青贮为全株,除引用数据外,其余为作者未发表数据。
Note: Silage is the whole plant, except for the reference data, the rest is the author’s unpublished data.

表 5 水果蔬菜类的食物当量

Table 5 Food equivalent unit of fruit and vegetable

项目	名称	标准含水量	能量	粗蛋白质	食物当量
Item	Name	Standard water content (%)	Energy (MJ · kg ⁻¹ DM)	Crude protein (g · kg ⁻¹ DM)	FEU
水果 Fruits	芭蕉 <i>Musa basjoo</i>	68.90	4.56	12.00	0.226
	白兰瓜 <i>Honeydew</i>	93.40	1.05	4.00	0.056
	菠萝 <i>Ananas comosus</i>	40.50	2.43	3.00	0.111
	草莓 <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i>	91.10	1.55	7.00	0.085
	橙 <i>Citrus sinensis</i>	87.40	1.98	8.00	0.106
	梨 <i>Pyrus</i> spp.	91.00	1.42	5.00	0.127
	荔枝 <i>Litchi chinensis</i>	87.90	1.93	8.00	0.139
	芒果 <i>Mangifera indica</i>	86.70	2.55	7.00	0.136
	柠檬 <i>Citrus limon</i>	82.40	2.68	9.00	0.070
	苹果 <i>Malus domestica</i>	74.50	2.76	7.00	0.104
	葡萄 <i>Vitis vinifera</i>	91.00	0.84	12.00	0.143
	西瓜 <i>Citrullus lanatus</i>	87.40	2.34	2.00	0.060
	香蕉 <i>Musa nana</i>	87.50	3.01	6.00	0.239
蔬菜 Vegetables	白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	95.90	0.50	12.00	0.056
	菠菜 <i>Spinacia oleracea</i>	90.30	1.09	32.00	0.139
	青椒 <i>Capsicum annuum</i>	93.40	0.92	12.00	0.074
	番茄 <i>Lycopersicon esculentum</i>	93.50	0.92	11.00	0.071
	胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	90.10	1.76	11.00	0.106
	黄瓜 <i>Cucumis sativus</i>	95.40	0.63	9.00	0.053
	萝卜 <i>Raphanus sativus</i>	92.70	0.81	8.00	0.057
	莲藕 <i>Nelumbo nucifera</i>	80.50	3.01	17.00	0.176
	平菇 <i>Pleurotus ostreatus</i>	92.00	0.75	19.00	0.087
	茄子 <i>Solanum melongena</i>	92.40	1.05	11.00	0.076

2.1.4 饲草转化为动物产品的效率 饲草转化畜产品才能为人类直接利用,其转化效率是饲用价值评价的关键。肥猪的肉料比是 1 : 3,猪生产系统包括大、小、公、母,其肉料比大约是 1.0 : 3.5,即每 1 kg 猪肉,需花费 3.5 kg 饲料^[2]。猪生产系统要生产 1 个食物当量,需要消耗 3.48 个食物当量的饲料。2015 年我国人均猪肉消费量是 37 kg,那么人均消耗的猪肉所需的饲料为 109.52 个食物当量,而我国人均粮食消费量 106 个食物当量^[21],加上用籽实饲喂草食家畜,人畜争粮,粮食生产压力巨大(表 6)。

2.1.5 动物性食物的食物当量 食物当量也可用于比较动物性食物。动物性食物包括传统的畜禽,也包括水产品,为人类直接食用。16 种动物性食物的食物当量在 0.26~1.36,多集中于 0.85~1.10,平均为 0.90(表 7)。

2.2 用食物当量评价草地农业系统的生产力

2.2.1 草原与栽培草地的食物生产能力 天然草原的饲草食物当量受水热条件的影响较大。21 个类草原的食物当量生产水平在 142~2739 FEU · hm⁻²;黄土高原产草量低,食物当量的生产能力平均 876 FEU · hm⁻²;高海拔地区虽然热量不足,但光照充足、辐射强,牧草能量和粗蛋白含量较高,草原的食物当量生产力平均为 1367 FEU · hm⁻²,高于黄土高原和北方温带地区的草原。热带和亚热带地区,牧草生长快、易粗老,粗蛋白含量虽低,但产草量高,因此草原食物当量的生产力大(表 8),约为 1400~1800 FEU · hm⁻²。栽培草地中,豆禾混播的多年生草地产量高,牧草粗蛋白含量和消化率高,食物当量较大(表 8)。

放牧系统的食物当量生产能力与草原类型密切相关(表 9)。典型草原和亚热带灌丛的放牧系统每 hm² 生产 55~262 FEU,高寒放牧系统的生产能力在 17~128 FEU · hm⁻²。

根据食物当量,草原类型之间、栽培草地之间、天然草原与栽培草地之间、放牧类型之间、放牧与刈割等利用方式之间可以比较食物生产能力。

2.2.2 用食物当量评价国家的食物生产能力 国家之间因发展水平和农业历史传统不同,相互之间难以比较,但是利用食物当量这个工具,可以统一衡量世界各国的食物生产能力。美国和澳大利亚是牛肉生产和消费大国,我国的羊肉产量和猪肉产量居于世界前位,根据食物当量的生产能力而言,美国动物性产品生产总量居世界首位。2012 年,我国猪肉产量 5343 万 t(表 10),按照 1.0 : 3.5 的肉料比来计算的话,大约需要 18699 万 t 食物当量的饲料来维持猪肉生产,这与美国、澳大利亚等国存在差异。

表 6 家畜生产的食物当量需求

Table 6 Demand of feed conversion ratios of livestock productions

家畜生产系统 Livestock production systems	体增重食物当量产量 Body weight gain production (FEU)	食物当量需求 Demand of FEU	比值 Ratio
猪 Pig	562	15	36.4
绵羊 Sheep	53	4	12.9
奶牛 Cow	388	7	55.1
肉牛 Beef	396	6	64.1

注:根据中国动物饲养参考标准计算。

Note: Calculated according to the reference standard of Chinese animal feeding.

表 7 动物产品的食物当量

Table 7 Food equivalent unit of animal products

名称 Name	标准含水量 Standard water content (%)	能量 Energy (MJ · kg ⁻¹ DM)	粗蛋白质 Crude protein (g · kg ⁻¹ DM)	食物当量 FEU
蛤蜊 Clam	84.10	1.30	58.00	0.260
蛏子 Razor clam	88.90	1.65	79.00	0.343
猪肉 Pork	8.10	5.98	132.00	0.851
鸡蛋 Egg	74.70	6.50	123.00	0.872
鸭蛋 Duck's egg	70.40	8.37	121.00	1.028
鲤鱼 Carp	76.70	5.13	171.00	0.877
草鱼 Grass carp	77.00	5.77	164.00	0.914
鹅 Goose	60.40	11.19	155.00	1.358
水牛肉 Buffalo meat	76.50	5.02	177.00	0.883
鸡肉 Chicken	65.00	7.53	185.00	1.119
山羊肉 Goat meat	71.00	6.90	187.00	1.071
牛肉 Beef	74.30	5.82	196.00	1.000
兔肉 Rabbit meat	76.20	4.29	202.00	0.884
羊肉 Mutton	70.30	6.68	194.00	1.069
马肉 Horseflesh	74.10	5.10	201.00	0.951
驴肉 Ass meat	73.80	4.52	228.00	0.970

表 8 草地的食物当量生产力

Table 8 Productivity of grassland based on feed equivalent unit

草原类和栽培草地 ^[35] Rangeland and pasture	地点 Site	产草量	消化率	饲草食物当量	食物当量生产力
		Yield (kg · hm ⁻²)	Digestibility (%)	FEU (kg ⁻¹)	FEU productivity (hm ⁻²)
寒温湿润山地草甸类 Cold, warm and humid mountain meadows 寒温潮湿草甸类 Cold, warm and humid meadows 寒温潮湿草甸类 Cold, warm and humid meadows 冷温温带荒漠类 Cold temperate desert 冷温湿润草甸类、冷温潮湿草甸类 Cold, warm and wet meadow 冷温潮湿草原类 Cold, warm and humid steppe 冷温潮湿草原类 Cold, warm and humid steppe 微温极干温带荒漠类 Micro-temperature and polar-dry temperate desert 微温微干典型草原类 Micro-temperature and micro-dry typical steppe 寒温潮湿草甸类 Cold, warm and humid meadows 微温微干草原类 Micro-temperature and micro-dry steppe 微温微干草原类 Micro-temperature and micro-dry steppe 微温微干草原类 Micro-temperature and micro-dry steppe 微温微润草原类 Micro-temperature and mildly moist steppe 微温湿润草甸类 Mild moist meadows 微温湿润草甸类 Mild moist meadows 微温干旱荒漠类 Mildly temperate arid desert 暖温干旱荒漠类 Warm and arid semi-desert 炎热微干稀树草原类 Hot dry savannas 微温干山地草原类 Micro-temperature and dry mountain steppe 亚热带微润硬叶林和灌丛类, 炎热微干稀树草原类 Sub-heat and hard leaf forest and shrubs, hot and dry savannas	玛曲县, 甘肃省 Maqu, Gansu	2960.00	72.00	0.842 ^[36]	2492.32
	玛曲县, 甘肃省 Maqu, Gansu	2042.00	59.86	0.679 ^[9]	1386.52
	仲巴县, 西藏 Zhongba, Tibet	1632.00	71.64	0.395 [*]	644.64
	平山湖区, 张掖, 甘肃 Pingshan lake district, Zhangye, Gansu	1181.02	61.05	0.797 ^[9]	941.27
	张家口, 河北 Zhangjiakou, Hebei	3268.35	77.40	0.838 ^[37]	2738.88
	扎兰屯, 内蒙古 Zhalantun, Inner Mongolia	4500.00	52.51	0.357 [*]	1606.50
	根河, 内蒙古 Genhe, Inner Mongolia	2149.30	84.09	0.484 [*]	1040.26
	民勤, 甘肃 Minqin, Gansu	310.88	62.75	0.566 ^[36]	175.96
	环县, 甘肃 Huan county, Gansu	1948.00	65.64	0.789 ^[36]	1536.97
	定日县, 西藏 Dingri county, Tibet	1408.55	72.19	0.457 [*]	643.71
	镶黄旗, 内蒙古 Xianghuang Banner, Inner Mongolia	325.00	84.00	0.541 [*]	175.83
	噶尔县, 西藏 Gaer county, Tibet	1428.70	90.47	0.586 [*]	837.22
	锡林浩特市, 内蒙古 Xilinhot city, Inner Mongolia	542.40	74.27	0.262 [*]	142.11
	正蓝旗, 内蒙古 Zhenglan Banner, Inner Mongolia	645.10	48.44	0.332 [*]	214.17
	额尔古纳旗, 内蒙古 Erguna Banner, Inner Mongolia	1288.90	80.17	0.326 [*]	420.18
	海拉尔, 内蒙古 Hailar, Inner Mongolia	1480.00	83.33	0.381 [*]	563.88
	四子王旗, 内蒙古 Siziwang Banner, Inner Mongolia	1124.20	66.09	0.868 [*]	975.81
	天山北坡, 新疆 Northern slope of Tianshan, Xinjiang	400.00	61.20	0.687 ^[38]	274.80
	奥贡州, 尼日利亚 Ogon state, Nigeria	5180.00	40.20	0.399 ^[39]	2066.82
亚热带微润硬叶林和灌丛类, 炎热微干稀树草原类 Micro-temperature and dry mountain steppe forest and shrubs, hot and dry savannas	堪萨斯州, 美国 Kansas, USA	3915.79	51.45	0.460 ^[40]	1801.26
	哥伦比亚 Colombia	3451.00	40.01	0.424 ^[41]	1463.22
	黄土高原 Loss Plateau	2400.00	60.40	0.560 ^[28]	1334.18
	黄土高原 Loss Plateau	800.00	63.70	0.520 ^[28]	417.93
	西北内陆干旱区 Arid inland area, northwest China	1016.32	75.80	0.600 ^{**}	609.45
首蓿/高羊茅混播草地 Alfalfa/tall fescue mixture	西北内陆干旱区 Arid inland area, northwest China	1449.36	64.20	0.740 ^{**}	1812.53

注: * 中国科学院草地资源数据库 <http://grassland.agridata.cn/>, * 数据来自作者 2014—2018 年河西内陆干旱区牧草种植试验未发表数据。

Note: * Chinese Academy of Agricultural Sciences Grassland Resources Database <http://grassland.agridata.cn/>, * Data from the author's unpublished data of forage planting trial in 2014—2018 at Hexi inland arid region.

表 9 放牧系统的食物当量生产能力^[42]

Table 9 Food equivalent unit of animal production in grassland

放牧系统类型 Grazing system type	草地类型 Grassland type	地点 Site	适宜放牧率 Proper stocking rate (sheep unit · hm ⁻²)	食物当量的生产能力 FEU production (FEU · hm ⁻²)
高寒放牧系统 Alpine grazing system	高寒荒漠草原 Alpine desert steppe	天山西部 Western Tianshan	0.32 ^[38]	17.10
	高寒草原 Alpine steppe	祁连山中部 Middle region of Qilian Mountain	0.85 ^[43]	45.43
	高寒草甸 Alpine meadow	甘南 Gannan	2.33 ^[44]	124.53
	高寒草原 Alpine steppe	藏北 Northern Tibet	生长季 Growth season<2.40 ^[45]	生长季 Growth season<128.27
半荒漠放牧系统 Sub desert grazing system	荒漠草原 Desert steppe	内蒙古四子王旗 Siziwang Banner, Inner Mongolia	1.03 ^[46]	55.05
典型草原放牧系统 Steppe grazing system	典型草原 Typical steppe	宁夏盐池县 Yanchi county, Ningxia	1.32 ^[47]	70.55
	典型草原 Typical steppe	甘肃环县 Huan county, Gansu	1.20 ^[48]	64.16
	典型草原 Typical steppe	内蒙古锡林郭勒盟 Xiligol League, Inner Mongolia	生长季,平地 Growth season, flatland<4.50,坡地 Sloping filed<3.00 ^[49]	生长季,平地 Growth season, flatland<240.51,坡地 Sloping filed<160.34
亚热带森林灌丛放牧系统 Subtropical forest shrub grazing system	岩溶山区灌丛 Karst mountain shrub	粤北 Northern of Guangdong	4.90 ^[50]	261.89

表 10 2012 年 3 个国家的食物当量生产^[51-52] *

Table 10 Food equivalent unit of grain and animal production in 2012 of China, USA and Australia

项目 Items	国家 Country	牛肉 Beef	羊肉 Mutton	牛奶 Milk	猪肉 Pork	动物食物生产力 Animal food productivity
产量 Yield (×10 ⁴ t)	中国 China	662	401	3743	5343	10149
	美国 USA	11848	7	9101	1055	22011
	澳大利亚 Australia	2152	55	948	35	3190
食物当量 FEU (×10 ⁷)	中国 China	662	438	2070	4546	7716
	美国 USA	11848	8	2841	898	15595
	澳大利亚 Australia	2152	59	296	30	2537

注：* 粮农组织共用数据库 <http://www.fao.org/statistics/databases/zh/>。

Note: * FAO database <http://www.fao.org/statistics/databases/en/>.

表 11 2012—2015 年我国进口饲料的食物当量^[53-54] *

Table 11 Food equivalent unit of import volume of animal feed in 2012—2015

项目 Items	时间 Year	苜蓿干草 Alfalfa hay		饲料玉米 Feed maize		豆粕 Soybean		总计 Total
		进口 Import	自产 Self-production	进口 Import	自产 Self-production	进口 Import	自产 Self-production	
产量 Yield (×10 ⁴ t)	2012	44	40	520	20790	4500	4800	5064
	2015	121	123	460	21800	8322	6120	36946
食物当量 FEU (×10 ⁷)	2012	44	40	199	7942	7983	8515	844
	2015	121	123	176	8328	14763	10857	48681

注：* 中华人民共和国海关总署 <http://www.customs.gov.cn/publish/portal0/tab49667/>。

Note: * General Administration of Customs <http://www.customs.gov.cn/publish/portal0/tab49667/>.

利用食物当量,不同质的饲草之间可以相互比较,有利于直观统计。我国 2012 年仅苜蓿干草的进口量就达 44 万 t,除此之外还有 520 万 t 的饲料玉米,4500 万 t 的饲用豆粕(表 11)(进口数据全部来自中国海关 <http://www.customs.gov.cn/publish/portal0/tab49667/>),换算成食物当量,一年进口 8226×10^7 万个食物当量左右。

3 讨论

3.1 两种食物当量计算方法的结果分析

本研究计算的食物当量与原公式相比^[20],谷物类在食物当量小于 1.23 时,原计算公式的结果大,反之则现公式的计算值高(图 1)。而水果类总体上旧值低于新值,但当食物当量小于 0.03 时反而高。蔬菜类食物当量高于 0.084 时,旧值高于新值,反之则低。动物性食物总体上新值多大于旧值,这与新公式强化了蛋白含量等品质指标有关(图 1)。

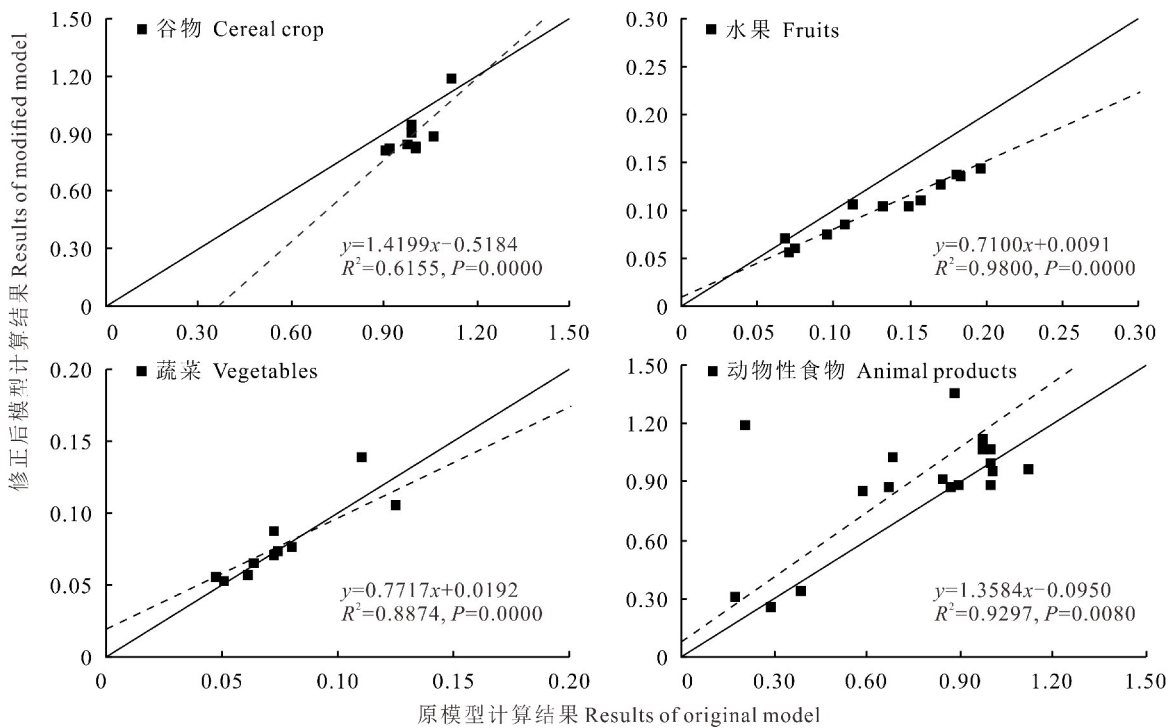


图 1 食物当量公式计算结果的相关性分析
Fig. 1 Correlation of forage equivalent unit

3.2 影响饲草食物当量的因素

饲草的饲用价值是一个包括动植物因素,甚至微生物因素的综合指标,影响家畜的生产性能。同时,气候、土壤、肥力及病虫害也会影响饲草的饲用价值^[55]。采食量是影响家畜生产的关键参数之一^[30],本研究未考虑饲草的适口性,因而缺乏与家畜采食量的联系。

3.2.1 饲草生育期 同种牧草在不同生育期的粗蛋白质等营养品质在茎叶之间的转移与分配不断发生着变化,从而导致牧草整体的饲用价值和利用率发生改变^[14,23,25]。因此,在牧草的食物当量计算中,需要说明所计算牧草所处的生育期。

饲草不同时期刈割调制青干草或青贮,其食物当量也有差异^[51-52,56]。饲草的蛋白质含量波动性较大,如紫花苜蓿,初花期粗蛋白含量达到峰值,盛花期收获,或者在成熟期收获,粗蛋白含量降低至 15%~18%,中花期干草的粗蛋白含量只有 16%^[57]。

3.2.2 饲草加工 牧草的加工一般有物理加工、化学加工和生物学处理 3 种,包括粉碎、制粒、碱化、氨化及人工发酵等。牧草经过适宜加工处理,可明显提高其适口性^[30]。牧草粉碎后提高采食量 7%,加工制粒增加采食

37%^[30];经过适当的化学处理可提高18%~45%,提高有机物的消化率30%~50%^[34]。青贮本身并不明显改善秸秆的饲用价值,主要是通过加工改变适口性,或者通过添加物质提高营养品质,扩大了饲草来源^[30]。牧草加工对开发牧草资源具有重要意义。

3.2.3 消化率的测定 消化率是计算饲草食物当量的重要参数。家畜品种、年龄、性别、体重,以及测定家畜消化率的技术都会影响饲草消化率的数值,从而影响饲草食物当量的计算(表12)^[22,58-60]。目前,各种饲草消化率的测定技术针对性较强,差异较大,为避免多种方法之间结果难以比较,建议用简单易行、成本低、准确性高的体外法测定^[30]。

表 12 家畜对几种牧草的消化率^[37,58-59,66-67]
Table 12 Digestibility of several forages for livestock

牧草 Forage	生育期 Growth stage	家畜 Livestock	干物质消化率 Dry matter digestibility	
			人工瘤胃法 Artificial rumen method	全收粪法 All collect method
苜蓿 <i>M. sativa</i>	孕蕾期—开花期 Bud stage-flowering stage	绵羊 Sheep	70.28	65.48
		山羊 Goat	63.56	67.40
		红鹿 Red deer	—	81.30
		骆驼 Camel	—	65.40
		奶牛 Cow	73.40	70.13
		肉牛 Beef cattle	76.39	62.40
白三叶 <i>T. repens</i>	开花期 Flowering stage	绵羊 Sheep	85.10	81.47
		肉牛 Beef cattle	84.21	75.00
燕麦 <i>A. sativa</i>	拔节期 Jointing stage	绵羊 Sheep	60.40	76.70
		牦牛 Yak	89.30	79.00

3.3 食物当量的应用

植物的食物当量针对家畜生产,家畜的食物当量针对人类。有些植物食物,如水果、蔬菜、小谷物等,可为人类食用,同时可用作饲料。饲草通过家畜采食、消化代谢转化为畜产品,若转换为畜产品的食物当量,可以比较动植物产品。

用食物当量还可以比较不同利用方式下土地的生产力。基于能量与蛋白质含量,食物当量将农田、草原和栽培草地等土地的生产力在统一量纲下计算出来,使它们可以互相比较。

4 结论

我国食物结构在近十年来发生了不可逆转的变化,动物产品和非谷类食物大幅度增加,主食与副食的界限逐渐模糊。食物当量打破了单纯以谷物为粮食的传统食物观,统一了食物的标准,即将各个地域、农业系统、饲草和家畜种类、饲草加工和利用方式的食物按统一的标准计算,尤其将植物性食物和动物性食物定量地联系起来,可以对居民的饮食结构和区域农业结构起指导作用,可为推动我国农业供给侧改革提供决策依据。

参考文献 References:

[1] Hou F Q, Xu L, Hou F J. Analysis of global livestock production in last half century. Pratacultural Science, 2010, 27(1): 130—135.
侯扶琴, 徐磊, 侯扶江. 近 50 年全球家畜生产分析. 草业科学, 2010, 27(1): 130—135.

[2] Ren J Z. The agricultural structure must adapt to the transformation of the food structure. Science & Technology Review, 2014, 32(3): 1.
任继周. 农业结构必须适应食物结构的转型. 科技导报, 2014, 32(3): 1.

[3] Huang J K. Key issues on supply-side structural reform in agriculture: Government functions and market roles. Chinese Rural

- Economy, 2018, (2): 2—14.
- 黄季焜. 农业供给侧结构性改革的关键问题: 政府职能和市场作用. 中国农村经济, 2018, (2): 2—14.
- [4] Ren J Z, Lin H L. Promoting prataculture development in arable region to ameliorate the farming system and insure food security in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(5): 1—9.
- 任继周, 林慧龙. 农区种草是改进农业系统、保证粮食安全的重大步骤. 草业学报, 2009, 18(5): 1—9.
- [5] Xu R G, Ren J Z, Nan Z B, *et al.* Strategies and policies for the ecological and food security of China's grassland. *Engineering Science*, 2016, 18(1): 8—16.
- 旭日干, 任继周, 南志标, 等. 保障我国草地生态与食物安全的战略和政策. 中国工程科学, 2016, 18(1): 8—16.
- [6] Ren J Z, Nan Z B, Lin H L. Taking the grassland agro-system to insure food security. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 1—10.
- 任继周, 南志标, 林慧龙. 以食物系统保证食物(含粮食)安全—实行草地农业, 全面发展食物系统生产潜力. 草业学报, 2005, 14(3): 1—10.
- [7] Yu J L, Shi H X. Grey relevance analysis and utilization potential on natural pastures nutrient constituent of alpine meadow. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2011, 32(4): 58—64.
- 于健龙, 石红霄. 高寒草甸主要乡土牧草营养成分的灰色关联综合评价及利用潜力. 家畜生态学报, 2011, 32(4): 58—64.
- [8] Liu J F, Wang X C, Liu W H. Production performance evaluation of four materials of *Elymus* in tongde region. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(6): 81—85.
- 刘军芳, 汪新川, 刘文辉. 四份披碱草属牧草在同德地区生产性能评价. 中国草地学报, 2010, 32(6): 81—85.
- [9] Shi Y, Ma Y L, Ma W H, *et al.* Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grassland. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(3): 226—239.
- 石岳, 马殷雷, 马文红, 等. 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. 科学通报, 2013, 58(3): 226—239.
- [10] Liang J Y, Jiao T, Wu J P, *et al.* The relationship between seasonal forage digestibility and forage nutritive value in different grazing pastures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 108—115.
- 梁建勇, 焦婷, 吴建平, 等. 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究. 草业学报, 2015, 24(6): 108—115.
- [11] Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dhima K V, *et al.* Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 2006, 99(2): 106—113.
- [12] Skidmore A K, Ferwerda J G, Mutanga O, *et al.* Forage quality of savannas-simultaneously mapping foliar protein and polyphenols for trees and grass using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 64—72.
- [13] Elgersma A, Søgaard K, Jensen S K. Herbage dry-matter production and forage quality of three legumes and four non-leguminous forbs grown in single-species stands. *Grass & Forage Science*, 2015, 69(4): 705—716.
- [14] Cao Z J, Shi H T, Li D F, *et al.* Progress on nutritional evaluation of ruminant feedstuff in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(3): 1—19.
- 曹志军, 史海涛, 李德发, 等. 中国反刍动物饲料营养价值评定研究进展. 草业学报, 2015, 24(3): 1—19.
- [15] Jung H G, Allen M S. Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(9): 2774—2790.
- [16] Williams B A, Givens D I, Owen E, *et al.* Cumulative gas-production techniques for forage evaluation. *Forage Evaluation in Ruminant Nutrition*, 2000.
- [17] Stergiadis S, Allen M, Chen X, *et al.* Prediction of metabolisable energy concentrations of fresh-cut grass using digestibility data measured with non-pregnant non-lactating cows. *British Journal of Nutrition*, 2015, 113(10): 1571—1584.
- [18] Xiao J Y, Hou F J, Guo Z G, *et al.* Dynamics of forage supplement and nutrition requirements of grazing sheep in alpine grasslands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 967—970.
- 肖金玉, 侯扶江, 郭正刚, 等. 高山草地绵羊放牧生态系统草畜营养供需动态. 应用生态学报, 2002, 13(8): 967—970.
- [19] Zhang G J, Wang H M, Luo H L, *et al.* Evaluation of nutritional values of leguminous forages in different growing periods by *in vitro* gas production and *in vitro* digestion techniques. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(3): 387—394.
- 张桂杰, 王红梅, 罗海玲, 等. 应用体外产气与体外消化法评定不同生育期豆科牧草营养价值. 动物营养学报, 2011, 23(3): 387—394.
- [20] Ren J Z, Hou F J. Change traditional thinking about food grain production and use food equivalent in yield measurement. *Acta Prataculturae Sinica*, 1999, (S1): 55—75.
- 任继周, 侯扶江. 改变传统粮食观, 试行食物当量. 草业学报, 1999, (S1): 55—75.
- [21] Ren J Z, Lin H L. Arable land equivalent unit and potential food productivity of land resources in China. *Acta Prataculturae*

- Sinica, 2006, 15(5): 1—10.
- 任继周, 林慧龙. 农田当量的涵义及其所揭示的我国土地资源的食物生产潜力——一个土地资源的食物生产能力评价的新量纲及其在我国的应用. 草业学报, 2006, 15(5): 1—10.
- [22] Ma X S. A comparative study on grazing feed and forage digestibility of holstein dairy cows with different phenology-hulun buir meadow prairie region. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- 马学升. 不同物候期荷斯坦奶牛放牧采食量与牧草消化率的比较研究——呼伦贝尔草甸草原地区. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [23] Huang X S, Yang X, Huang Q L, *et al.* Ruminal in situ disappearance kinetics of nutrient components in different stage of two *Cassia*. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(4): 682—688.
- 黄秀声, 杨信, 黄勤楼, 等. 2 种决明属牧草不同生育期营养成分在肉牛瘤胃降解动态研究. 草地学报, 2011, 19(4): 682—688.
- [24] Wang D M. On the digestive and physiological characteristics of domestic animals. Charming China, 2014, (5): 396.
- 王丹梅. 浅谈家畜的消化生理特点. 魅力中国, 2014, (5): 396.
- [25] He H X. Seasonal changes of nutrients in natural grassland and their digestibility of sheep. Shihezi: Shihezi University, 2015.
- 和海秀. 天然草地不同牧草营养物质四季变化及绵羊消化率的研究. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [26] Ren J Z. The lessons of three agricultural structural reforms in China and expectations in future. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(12): 1—3.
- 任继周. 中国三次农业结构改革的教训与期望. 草业学报, 2016, 25(12): 1—3.
- [27] Yang T H, Cheng H, Kin E J, *et al.* Responses of high-sugar ryegrass productive performance to stimulated grazing on the Loess Plateau. Pratacultural Science, 2015, 32(9): 1473—1481.
- 杨天辉, 成慧, KIM E J, 等. 黄土高原模拟轮牧对高糖黑麦草生产性能的影响. 草业科学, 2015, 32(9): 1473—1481.
- [28] Cheng H, Chang S H, Chen X J, *et al.* Influence of simulated rotational grazing on the forage production of spring wheat, oats and rye in the Yellow River irrigation area. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(6): 92—98.
- 成慧, 常生华, 陈先江, 等. 引黄灌区模拟轮牧对春小麦、燕麦和黑麦草生产的影响. 草业学报, 2015, 24(6): 92—98.
- [29] Hu A, Kang Y, Hou F J. The prediction of alfalfa forage composition and yield established on Loess Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 1155—1163.
- 胡安, 康颖, 侯扶江. 黄土高原紫花苜蓿产草量与营养品质预测. 草地学报, 2016, 24(6): 1155—1163.
- [30] Feng Y L. Ruminant nutrition. Beijing: Science Press, 2004.
- 冯仰廉. 反刍动物营养学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [31] Li D F. Technology is the key to promote the transformation and upgrading of animal husbandry in China. China Food, 2016, 695(7): 104—105.
- 李德发. 科技是促进我国畜牧业转型升级的关键. 中国食品, 2016, 695(7): 104—105.
- [32] Zhang Y J, Ren J Z, Wang M L, *et al.* Discussion on the position and development distribution of forage industry in China's agricultural industry structure. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(4): 61—71.
- 张英俊, 任继周, 王明利, 等. 论牧草产业在我国农业产业结构中的地位和发展布局. 中国农业科技导报, 2013, 15(4): 61—71.
- [33] Ren J Z, Hu Z Z, Mou X D. New indicators of prairie production capacity and assessment-livestock products unit. Chinese Journal of Animal Science, 1979, (2): 21—27.
- 任继周, 胡自治, 牟新待. 关于草原生产能力及其评定的新指标——畜产品单位. 中国畜牧杂志, 1979, (2): 21—27.
- [34] Hao C H, Wang J H. Nutritional limiting factors of straw and its modulation method. China Science & Technology Panorama Magazine, 2010, (10): 168.
- 郝彩虹, 王佳厚. 秸秆的营养限制因素及调制方法. 中国科技纵横, 2010, (10): 168.
- [35] Gao H Y, Guo J, Ren Z C, *et al.* Establishment of global grassland map based on the integrated orderly classification system of grassland. Grassland and Turf, 2011, 31(3): 15—19.
- 高怀瀛, 郭婧, 任正超, 等. 世界草地综合顺序分类图的制作. 草原与草坪, 2011, 31(3): 15—19.
- [36] Liu S S. Nutritional value of Qinghai-Tibet Plateau, Loess Plateau and northwest desert grassland. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- 刘盛晟. 青藏高原、黄土高原与西北荒漠草地的营养价值评定研究. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [37] Han J G, Wang P. Studies on range forage intake and digestibility of grazing sheep by using esophageal fistula samples. Grassland of China, 1994, (1): 65—68.
- 韩建国, 王培. 用食道瘻管对放牧绵羊采食量和消化率的研究. 中国草地学报, 1994, (1): 65—68.

- [38] Zhang J L, Zhang R P, Xi W L, *et al.* Evaluation system of determining optimal stocking rates of Tianshan mountain steppe—A case study in Xinyuan County, Xinjiang. *Pratacultural Science*, 2010, 27(12): 134—139.
张建立, 张仁平, 锡文林, 等. 天山山地草原适宜放牧率评价体系初探—以新疆新源县为例. *草业科学*, 2010, 27(12): 134—139.
- [39] Okwori A I, Magani I E. Influence of nitrogen sources and cutting interval on the digestility of four grass species in the Southern Guinea Savanna of Nigeria. *Agriculture & Biology Journal of North America*, 2010.
- [40] Ovington J D, Lawrence D B. Comparative chlorophyll and energy studies of prairie, savanna, oakwood, and maize field ecosystems. *Ecology*, 1967, 48(4): 516—524.
- [41] Lascano C, Plazas C. Protein and energy banks in native savannas of the oriental plains of Colombia. *Pasturas Tropicales*, 1990: 9—15.
- [42] Hou F J, Ning J, Feng Q S. The type and productivity of grassland grazing system. *Pratacultural Science*, 2016, 33(3): 353—367.
侯扶江, 宁娇, 冯琦胜. 草原放牧系统的类型与生产力. *草业科学*, 2016, 33(3): 353—367.
- [43] Guo Y R, Hou F J. Relationships between snow coverage, vegetation, and terrain in the winter pasture on the north slope of Qilian Mountains. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, 42(3): 255—261.
郭雅蓉, 侯扶江. 祁连山北坡冬季牧场积雪盖度与植被、地形的关系. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(3): 255—261.
- [44] Sun Y, Angerer J P, Hou F J. Effects of grazing systems on herbage mass and liveweight gain of Tibetan sheep in Eastern Qinghai—Tibetan Plateau, China. *Rangeland Journal*, 2015, 37(2): 181—190.
- [45] Gan Z Z B, Guo Y Q, Gao Q Z, *et al.* A study on optimal grazing rates in *Stipa purpurea* alpine grassland in Northern Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 130—137.
干珠扎布, 郭亚奇, 高倩竹, 等. 藏北紫花针茅高寒草原适宜放牧率研究. *草业学报*, 2013, 22(1): 130—137.
- [46] Han G D, Jiao S Y, Bi L G T, *et al.* Effects of plant species diversity and productivity under different stocking rates in the *Stipa breviflora* Griseb. desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 182—188.
韩国栋, 焦树英, 毕力格图, 等. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响. *生态学报*, 2007, 27(1): 182—188.
- [47] Ma H B, Xie Y Z. Studies on construction of grassland agro-ecosystem in the drought region of middle Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 180—184.
马红彬, 谢应忠. 宁夏中部干旱带草地生态农业体系建设研究. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 180—184.
- [48] Hou F J, Nan Z B, Xie Y Z, *et al.* Integrated crop-livestock production systems in China. *Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 221—231.
- [49] He N P, Han X G, Yu G R. Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 844—851.
何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力. *生态学报*, 2012, 32(3): 844—851.
- [50] Yiruhan, Xie X M, Shiyomi M. Aboveground plant mass and mass available to grazing goats in a mountainous shrubland in subtropical China. *Grassland Science*, 2011, 57(3): 119—126.
- [51] Yang Y G, Cheng T L, Yang X J, *et al.* Effects of different growth stages of three oat cultivars on the nutritive value of silage. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(4): 683—688.
杨云贵, 程天亮, 杨雪娇, 等. 3 个燕麦品种不同收获期对青贮饲草营养价值的影响. *草地学报*, 2013, 21(4): 683—688.
- [52] Cui W D, Dong Z X, Zhang J G, *et al.* The nutrient components and ensilage fermentation quality of sweet corn stalks harvested at different times. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 208—213.
崔卫东, 董朝霞, 张建国, 等. 不同收割时间对甜玉米秸秆的营养价值和青贮发酵品质的影响. *草业学报*, 2011, 20(6): 208—213.
- [53] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2013.
中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [54] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2016.
中华人民共和国国家统计局. *中国统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [55] Ren J Z. *Grassland ecology and grassland agroecology*. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [56] Wang C H, Yang J Q, Dong K H, *et al.* Effects of different cutting ways on the nutritive value of alfalfa meal. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 140—142.

- 王常慧, 杨建强, 董宽虎, 等. 不同刈割方式对苜蓿草粉营养价值的影响研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 140—142.
- [57] Wang C H, Yang J Q, Wang Y X, *et al.* Effects of the different harvesting time and different drying ways on nutrient levels in alfalfa meal. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2004, 16(2): 60—64.
- 王常慧, 杨建强, 王永新, 等. 不同收获期及不同干燥方法对苜蓿草粉营养成分的影响. 动物营养学报, 2004, 16(2): 60—64.
- [58] Sampaio C B, Detmann E, Paulino M F, *et al.* Intake and digestibility in cattle fed low-quality tropical forage and supplemented with nitrogenous compounds. Revista Brasileira De Zootecnia, 2010, 42(7): 1471—1479.
- [59] Jones P D, Rude B, Muir J P, *et al.* Condensed tannins' effect on white-tailed deer forage digestibility in mississippi. Journal of Wildlife Management, 2010, 74(4): 707—713.
- [60] Cantalapiedra-Hijar G, Yáñez-Ruiz D R, Martín-García A I, *et al.* Effects of forage: Concentrate ratio and forage type on apparent digestibility, ruminal fermentation, and microbial growth in goats. Journal of Animal Science, 2009, 87(2): 622—631.
- [61] Sun S X, Yang S L, Mao H M, *et al.* Effect of different harvest time on digestibility of alfalfa. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2010, (13): 99—100.
- 孙仕仙, 杨思林, 毛华明, 等. 不同时期收获对紫花苜蓿体外消化率的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2010, (13): 99—100.
- [62] Zhang X Q, Wu Q Y, Hao Z L, *et al.* Studies on the dynamic changes of nutrients and *in vitro* digestibility of different *Medicago sativa* species. Pratacultural Science, 2005, 22(12): 48—51.
- 张晓庆, 吴秋珏, 郝正里, 等. 不同品种苜蓿营养成分及体外消化率动态研究. 草业科学, 2005, 22(12): 48—51.
- [63] Hong J S, Liu S J, Chai S T, *et al.* Assessing nutritional value of Qinghai local oat hay with *in vitro* gas production method and nylon bags method. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2009, 36(3): 36—38.
- 洪金锁, 刘书杰, 柴沙驼, 等. 体外产气法与尼龙袋法评定青海当地燕麦青干草营养价值. 中国畜牧兽医, 2009, 36(3): 36—38.
- [64] Wang H M, Wang Z L. Evaluation of nutritional values of foreign large-leave white clovers by gas production *in vitro* and digestion techniques *in vitro*. Feed Industry, 2016, 37(20): 30—33.
- 王红梅, 王仲良. 应用体外产气和体外消化法评定国外大叶型白三叶营养价值. 饲料工业, 2016, 37(20): 30—33.
- [65] Zhang G J, Luo H L, Zhang Y J, *et al.* Evaluation of white clover's nutrition value by *in vitro* gas production and *in vitro* digestibility. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(2): 53—58.
- 张桂杰, 罗海玲, 张英俊, 等. 应用体外产气与活体外消化率法评定盛花期白三叶牧草营养价值. 中国农业大学学报, 2010, 15(2): 53—58.
- [66] Fraser M D, Gordon I J. Organic matter intake, diet digestibility and feeding behavior of goats, red deer and south american camelids feeding on three contrasting scottish vegetation communities. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(3): 687—698.
- [67] Li K, Zhang S M, Zhang D D, *et al.* Digestibility determination of elaphurus davidianus for *Medicago sativa*. Journal of Economic Animal, 2007, 11(2): 76—79.
- 李坤, 张树苗, 张冬冬, 等. 麋鹿对紫花苜蓿消化率的初步测定. 经济动物学报, 2007, 11(2): 76—79.