植物营养与肥料学报 2005,11(5): 578 - 583
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土丘陵区土壤—作物系统氮素特征与管理

王改兰[1], 段建南[1*], 李旭霖[2], 贾宁凤[3]
(1 湖南农业大学资源环境学院,湖南长沙 410128; 2 莱阳农学院农学系,山东青岛 266109;
3 山西大学经济与工商管理学院,山西太原 030006)

摘要: 基于长期定位试验,对黄土丘陵区的晋西北河曲县砖窑沟试验区土壤氮素资源与分布,土壤氮素变化和农田氮素平衡进行了分析,并探讨了该区氮素管理策略和施肥方案。结果表明,试验区土壤全氮含量平均为 0.4 g/kg,土壤碱解氮为 16.76 mg/kg,氮素水平低,供氮能力差。土壤氮素含量呈现耕地 > 草地 > 林地的分布态势。经过连续 13 年的施肥处理,施有机肥和有机、无机肥配施 0—20cm 土层全氮含量显著提高了 12.0%～105.6%,20—40cm 土层全氮含量变化没有显著差异; 各施肥处理 0—20cm 土壤碱解氮均呈上升趋势,增加了 32%～299%,土壤有效氮的增加与连续施入有机肥的量有关。施肥处理的糜子农田的土壤氮素均呈现出盈余状况,马铃薯田则基本保持平衡。因此,在轮作周期中应根据前茬作物的需氮特性和收成情况确定当季作物的氮肥施用量。糜子和马铃薯的施肥应以氮肥和有机肥为主,氮磷比例分别为 1:0.5 ～0.7 和 1:0.7 左右为宜。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤—作物系统; 土壤氮素; 施肥; 长期定位试验
中图分类号: S154.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2005)05-0578-06

Nitrogen characteristics and its management of soil-crop systems in loess hill area

WANG Gai-lan[1], DUAN Jian-nan[1], LI Xu-lin[2], JIA Ning-feng[3]
(*1 College of Resour. and Envir., Hunan Agri. Univ., Changsha 410128, China; 2 Dept. of Agron., Laiyang Agric. College, Qingdao 266109, China; 3 School of Econ. and Industry Commerce Management, Shanxi Univ., Taiyuan 030006, China*)

Abstract: A long-term experiment was carried out on a typical loess soil in Hequ county, northeastern Shanxi province, to study the soil N fertility. Results showed that soil nitrogen content in the experiment area are much lower than those in other similar areas and the nitrogen supplying potential of soils is low (total N 0.4 g/kg averaged and alkali-hydrolyzable N 16.76 mg/kg averaged). The amounts of soil nitrogen content in arable land were highest, followed by pasture land and forest land. After 13 years continual application of single organic fertilizer or organic fertilization incorporated with chemical fertilizer, total nitrogen content increased by 12.0%—105.6% in the top soil (0—20cm). But no significant differences of total N contents were found in the subsurface layer (20—40cm) in all treatments. The alkali-hydrolyzable nitrogen contents showed a rising tendency with an increase by 32%—299% for each treatment in the top soil which could be attributed to the successive application of organic fertilizer. Soil N was surplus in millet field and was roughly balance in potato fields for all fertilizer applied treatments. N application rate of current crop should be confirmed in terms of N requirement of current crop and the yield of previous crop in the rotation system. As to millet and potato, fertilization should emphasis the N fertilizer and organic fertilizer. The rational application ration of N to P for millet should be 1 to 0.5—0.7 and 1 to 0.7 for potato.

Key words: loess hill area; soil-crop systems; soil nitrogen; fertilization; long-term experiment

收稿日期: 2004-09-24　　**修改稿收到日期**: 2004-11-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(49971040); 山西省自然科学基金项目(971066)资助。
作者简介: 王改兰(1959—),女,山西太原人,副教授,主要从事土壤与肥料教学与研究。　*通讯作者

砖窑沟位于晋陕蒙三省区交界处的晋西北河曲县中西部，是一个由东向西直接流入黄河的小流域，属于典型的黄土丘陵区。主沟长 14.15 km，流域面积 28.7 km^2。流域范围涉及以河曲县沙坪乡为主的19个行政村，总人口为 2880 人，平均人口密度约为 100 人/km^2，是国家"七五"科技攻关项目—黄土高原综合治理的 11 个试验示范区之一。1986 年以来，为建设高效稳定的土壤—作物生态系统，进行了土壤肥力变化与施肥管理试验研究，包括有机无机肥料对土壤培肥作用的长期定位试验、农田土壤水量平衡试验、糜子高产施肥数学模型试验研究、马铃薯高产施肥数学模型试验研究、新修梯田当年受益与快速培肥措施试验和多点基础肥力对比试验等。

国内外有关农田土壤—作物生态系统中的养分循环与平衡的研究主要针对小麦、玉米、水稻、棉花和大豆等作物[1-4]，对糜子、马铃薯及其定位试验条件下土壤—作物生态系统的养分特征与管理研究较少。为此，以砖窑沟试验区的长期定位试验为主，结合其它相关试验研究和试验区面上多点调查取样分析结果，针对当地的主要作物：糜子和马铃薯，分析不同施肥条件下的氮素特征，为当地土壤—作物系统的氮素管理提供科学依据。

1　材料与方法

该试区土壤以栗褐土为主，其中淡栗褐土分布最广，占 72.5%，风沙土、粗骨性土和黄绵土也占一定比例。其土壤是以黄土为主体的较为单一的成土母质，质地偏轻，大多为通体轻壤的土体构型，碎块状结构，孔隙发达，通透性较好，腐殖化、钙积、粘化等成土过程较弱，土体化学分异不明显，土壤剖面富含 $CaCO_3$，含量一般为 60～140g/kg，pH 值 8.1～8.4，土壤有机质一般在 5 g/kg 左右，全氮含量平均为 0.41 g/kg，全磷(P)含量平均为 0.49 g/kg[5]。近年来糜子种植面积占粮食作物播种面积的 47.2%，马铃薯种植面积占 38%。

长期定位试验设置在沙坪村窑家嘴梁顶平地上，供试土壤为轻壤黄土质淡栗褐土，为试验区的主要耕地土壤。试验初始土壤理化性状见表 1。试验设 8 个处理，3 次重复，随机区组排列，小区面积 4 m×6 m，每年各处理所有肥料均于春耕时一次施入，试验处理及其施肥量见表 2。氮肥用含 N 46%的尿素，磷肥用含 P_2O_5 14%的过磷酸钙，有机肥施用当地圈肥。种植作物为当地主要作物糜子—马铃薯轮作，耕作管理措施与大田相同，收获时按小区单收单打计产。每两年在各小区内采集一次 0—20 和 20—40 cm 的分层土样，测定土壤理化性状[6-7]。

2　结果与讨论

2.1　试验区土壤氮素资源分布与评价

根据砖窑沟试验区内 46 个表土农化样品的测定和统计分析，试验区土壤全氮含量变动范围为 0.19～0.7 g/kg，平均为 0.4 g/kg，经分布频率趋势模拟分析，属于正态分布类型(图 1)；绝大多数样本全氮含量在 0.30～0.50 g/kg 之间，处于严重缺氮状态。土壤碱解氮变幅较大，在 2.01～44.0 mg/kg 之间，平均值为 16.76 mg/kg，呈偏态分布(图 2)；其中

表 1　供试土壤理化性状(1988 年 5 月 测定)

Table 1　Some physical and chemical properties of the soil tested (In May 1988)

深度 Depth (cm)	有机质 OM. (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrol. N (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)	CEC (cmol/kg)	$CaCO_3$ (g/kg)	pH	质地 Texture	容重 Bulk density (g/cm^3)
0—20	5.64	0.445	0.54	13.95	2.85	6.97	135.5	8.06	轻壤 Light loam	1.2
20—40	4.28	0.336	0.54	10.47	3.96	6.74	131.4	8.06	轻壤 Light loam	1.3

表 2　试验处理及其施肥量(kg/hm^2)

Table 2　Experiment treatments and the fertilizer rate

肥料 Fertilizers	CK	N	NP	M1	M1N	M1NP	M2N	M2NP
OM	0	0	0	22500	22500	22500	45000	45000
N	0	120	120	0	120	120	120	120
P_2O_5	0	0	75	0	0	75	0	75

<10 mg/kg 的样本占 36.6%，10～20 mg/kg 的占 46.3%。可见试验区土壤氮素含量水平极低，供氮能力差。从空间分布情况看，不同土地利用方式的氮素含量有差异（表 3），试验区氮素表现为耕地 > 草地 > 林地的趋势，与黄土高原总体趋势[8]林地 > 草地 > 耕地不同。分析其原因，主要是当地土壤比较贫瘠，养分本底值低，而且林草地历史短，且主要用作放牧，地上归还和投入极少；耕地种植历史长，有一定的投入，因此有所积累。从剖面分布来看，不论何种利用方式，全氮和碱解氮均呈现由上到下逐渐减少的趋势。

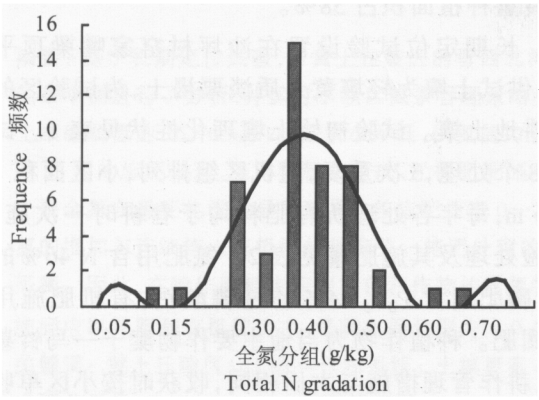

图 1 表土全氮含量频数分布

Fig.1 Frequency distribution of the total N content in topsoil

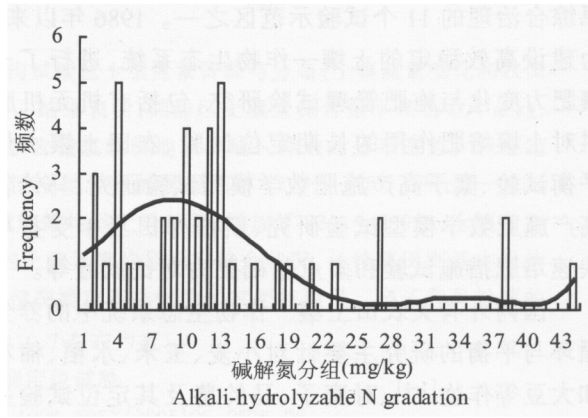

图 2 表土碱解氮含量频数分布

Fig.2 Frequency distribution of the alkali-hydrolyzable N content in topsoil

表 3 不同利用方式下土壤氮素含量

Table 3 Soil nitrogen contents of main land use types in the area

剖面层次 Soil profile	耕地 Arable land		林地 Forest land		草地 Pasture land
	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N (mg/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N (mg/kg)	全氮 Total N (g/kg)
表土层 Top soil	0.44	22.32	0.31	3.14	0.39
亚表土层 Second top soil	0.35	16.76	0.24	2.42	0.29
心土层 Subsoil	0.25	8.42	0.19	2.04	0.29

注（Note）：表中为各类的平均值，耕地样品数为 25，林地 13，草地 8。Data is averaged from 25 arable land, 13 forest land and 8 pasture land samples, respectively.

2.2 长期定位试验条件下的土壤氮素变化

2.2.1 连续施肥对土壤全氮的影响 图 3 看出，经过 13 年的施肥处理，表土（0—20 cm）全氮含量发生了明显变化。其中，对照处理（CK）土壤全氮比试验前降低了 38.8%，氮磷配施（NP）处理也有所降低（14.6%），其余处理土壤全氮均比试验前提高了 7.9%～105.6%，而且施高量有机肥的处理提高的幅度明显高于（60%以上）其他处理。

对 2000 年的土壤全氮测定结果进行方差分析，结果表明，表土处理间差异显著，单施有机肥的处理（M1）和有机无机配施的处理与单施化肥的处理（N、NP）和对照（CK）间有显著差异，即连续施有机肥能够提高表土全氮含量。 20—40 cm 土层全氮含量虽

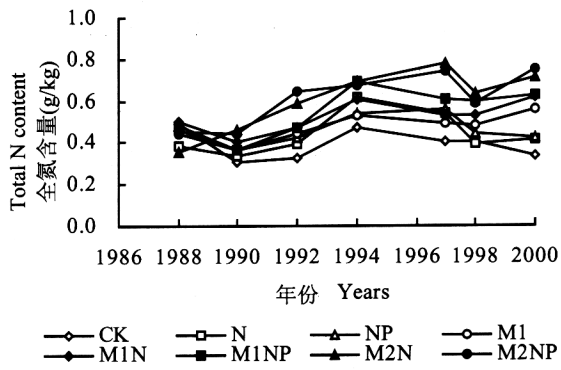

图 3 表层土壤（0—20cm）全氮的变化

Fig.3 Changes of total N in 0—20 cm soil layer

有些变化(表4),但处理间差异未达显著水平。说明经过13年的培肥处理,已对表土全氮含量产生了重要影响,而对20—40 cm土壤尚未产生明显影响。

表4　连续施肥20—40 cm土层全氮变化(g/kg)

Table 4　Changes of soil total N in 20—40 cm soil layer under continual fertilization treatments

年份 Year	CK	N	NP	M1	M1N	M1NP	M2N	M2NP
1988	0.39	0.32	0.40	0.38	0.21	0.34	0.27	0.38
1990	0.20	0.23	0.21	0.22	0.23	0.23	0.28	0.22
1994	0.44	0.47	0.44	0.43	0.46	0.39	0.39	0.41
1997	0.21	0.28	0.27	0.31	0.26	0.27	0.35	0.36
1998	0.37	0.25	0.23	0.29	0.38	0.34	0.49	0.29
2000	0.26	0.24	0.24	0.25	0.23	0.24	0.32	0.25

2.2.2　连续施肥对土壤碱解氮的影响　不同处理土壤0—20 cm碱解氮变化虽然波动较大(图4),但从总体上看,除CK试验前后变化不大,其余各施肥处理均呈上升趋势,增加32%～299%。其中以M2NP、M2N、M1N增加幅度较大(大于160%),其次为M1NP、N、M1、NP。方差分析和多重比较结果表明,高量有机肥处理(M2N、M2NP)与低量有机肥处理(M1N、M1NP、M1)间有显著差异,而CK、NP、N间未达显著差异。说明土壤碱解氮增加的主要原因是大量有机肥的施入,导致土壤有机质的增加,其通过微生物的作用,不断分解释放出有效氮。

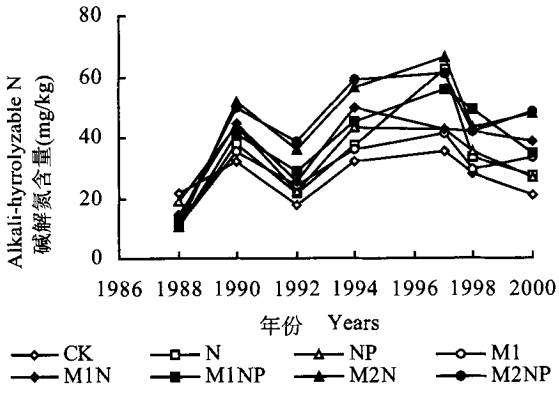

图4　表层土壤(0—20cm)碱解氮的变化

Fig.4　Changes of alkali-hydrolyzable N in 0—20cm soil layer

2.3　土壤—作物系统氮素平衡状况

2.3.1　作物产量和氮素含量　黄土丘陵区主要作物多年平均生物量,糜子为6153 kg/hm²、马铃薯为3675 kg/hm²,不及长江中下游高产区单季作物生物量180000 kg/hm²的1/3,为东北辽东棕黄土区9900 kg/hm²的1/2,属初级生物量低的地区[9]。表5表明,13年施肥试验平均生物量,糜子为6061、马铃薯为3763 kg/hm²;平均经济产量分别为2462.0和2220.5 kg/hm²,经济系数为42%和60%。

黄土丘陵区主要作物各部位氮素含量一般在1～100 g/kg之间。糜子的氮素含量以子实中最高,为15.3 g/kg(干基),穗、叶、根、茎依次为8.9、6.5、6.1、3.1 g/kg(干基);马铃薯全株的氮素含量为11.8 g/kg(干基),叶、块茎、茎分别为20.4、11.0、10.3 g/kg(干基)[9-10]。

表5　试验作物不同施肥处理平均产量和经济系数

Table 5　Average yield and economic coefficient of crops tested in different treatments

项目 Item	作物 Crops	处理 Treatments								平均 Average
		CK	N	NP	M1	M1N	M1NP	M2N	M2NP	
经济产量(kg/hm²)	糜子 Millet	956.3	2341.3	2697.8	2087.3	2849.0	2993.3	2957.5	2814.0	2462.0
Economic yield	马铃薯 Potato	1087.2	1874.5	2278.9	1719.4	2636.5	2673.0	2775.2	2719.2	2220.5
生物产量(kg/hm²)	糜子 Millet	2094.0	5053.1	6580.1	4425.3	7274.0	7774.8	7681.8	7605.4	6061.1
Biomass	马铃薯 Potato	1630.8	3186.0	4181.4	2625.1	4722.1	4455.1	4677.3	4621.9	3762.5
经济系数(%)	糜子 Millet	46	46	41	47	39	39	39	37	42
Economic coefficient	马铃薯 Potato	67	59	55	66	56	60	59	59	60

2.3.2　氮素平衡状况　农田化肥N和有机肥N的输入按实测计,尿素的氮素损失以40%计[11-12];农田作物地上部携走氮素按实测计。参考有关资料计算降水的氮素输入为4.5 kg/hm²,糜子种子播种量

以 30 kg/hm² 计，氮素输入为 585 g/hm²；马铃薯块茎种子播种量以 1650 kg/hm² 计，氮素输入为 18.15 kg/hm²。试验地为梁顶平地基本无水土流失。淋溶渗漏根据土壤剖面状况尤其是挖填方、质地等状况确定，按 2%～10% 计。根据上述氮素循环有关参数，土壤—作物系统氮素平衡可用下式计算：

氮素平衡 =（肥料氮 + 种子氮 + 降水氮 + 生物固氮）-（流失氮 + 淋溶渗漏氮 + 作物地上部携走氮）。

表 6 看出，长期定位试验条件下土壤—作物系统氮素平衡状况，总体上除不施肥处理（CK）土壤氮素呈亏缺状况，其余所有施肥处理土壤氮素呈盈余状况。在轮作周期中，糜子所有施肥处理每年都有盈余，而马铃薯所有施肥处理虽基本保持平衡或略有盈余，但是在有些年份的单施化肥和单施有机肥的处理（N、NP、M1）出现亏缺现象，主要发生在作物收成好的年份。可见氮素盈亏主要取决于施肥量和作物的生物产量以及不同作物的养分吸收特性。如马铃薯的土壤氮素输入输出比多年平均为 1.16，而糜子为 3.70，是马铃薯的 3 倍多。说明糜子与马铃薯相比，对土壤氮素的吸收利用较少。因此在氮素施肥管理中，应根据轮作周期中前茬作物的收成情况和需氮特性及当季作物的需氮特性，调节氮肥施用量。

表 6 糜子和马铃薯不同施肥处理农田氮素平衡状况（kg/hm²）

Table 6 Nitrogen balance in field of tow crops on treatments of the experiment

项目 Item	作物 Crops	处理 Treatments CK	N	NP	M1	M1N	M1NP	M2N	M2NP	平均 Average
输入量 Input	糜子（6 年平均） Millet（Aver. in 6 yrs）	5.09	125.09	125.09	96.36	216.36	216.36	307.64	307.64	174.95
	马铃薯（6 年平均） Potato（Aver. in 6 yrs）	22.65	142.65	142.65	95.10	215.10	215.10	287.55	287.55	176.04
	12 年平均 Average in 12 yrs	13.87	133.87	133.87	95.73	215.73	215.73	297.59	297.59	175.50
输出量 Output	糜子（6 年平均） Millet（Aver. in 6 yrs）	15.37	37.69	45.38	32.87	49.87	52.34	51.92	52.30	42.22
	马铃薯（6 年平均） Potato（Aver. in 6 yrs）	66.74	119.68	148.65	105.70	168.50	167.92	175.68	173.11	140.75
	12 年平均 Average in 12 yrs	41.06	78.69	97.02	69.29	109.19	110.13	113.80	112.70	91.48
输入/输出 Input/output	糜子（6 年平均） Millet（Aver. in 6 yrs）	0.331	3.318	2.756	2.932	4.339	4.134	5.926	5.882	3.702
	马铃薯（6 年平均） Potato（Aver. in 6 yrs）	0.339	1.192	0.960	0.900	1.277	1.281	1.637	1.661	1.156
	12 年平均 Average in 12 yrs	0.338	1.701	1.380	1.382	1.976	1.959	2.615	2.640	1.749

3 氮素管理建议

3.1 氮素管理基本策略

砖窑沟试验区土壤氮素水平低，供氮能力差，为改善土壤肥力，提高耕地生产力，应采取有机无机肥配合的施肥策略，尤其是低产土壤应采取连续重施有机肥的措施。在马铃薯与糜子的轮作周期中，马铃薯比糜子消耗氮素多，不同年景作物消耗氮素差异较大，因此应根据前茬作物的需氮特性和收成情况确定当季作物的氮肥合理施用量，以保证氮肥施用的经济效益和生态环境效应。

3.2 平衡施肥方案

根据糜子和马铃薯高产施肥数学模型试验结果[13-14]，不同肥料对糜子和马铃薯两种主要作物的增产效应均为氮肥 > 有机肥 > 磷肥。因此，糜子和马铃薯的施肥重点都是氮肥和有机肥。

通过模拟选优，推荐糜子高产优化施肥方案为：有机肥 51 ～57 t/hm²，氮（N）126 ～132 kg/hm²，磷（P_2O_5）66 ～93 kg/hm²，N:P_2O_5 为 1:0.5 ～0.7。实施此方案，丰水年可获得糜子单产 3.4 t/hm² 以上，肥料对于糜子的增产效应分别为每百千克有机肥增产 0.5～0.9 kg，每千克氮（N）增产 8.5 ～12.9 kg、磷

(P_2O_5)增产 6.3～8.4 kg;一般旱年可获得糜子单产 3 t/hm^2 以上,肥料效应分别为有机肥百千克增产 1.2～1.3kg、N 每千克增产 5.4～9.3kg、P_2O_5 每千克增产 2～3 kg。中等肥力土壤种植马铃薯的高产优化施肥推荐方案为:有机肥 44～56 t/hm^2,氮(N) 127.5～157.5 kg/hm^2,磷(P_2O_5)87～111 kg/hm^2。N:P_2O_5 为 1:0.7 左右,实施此方案可获得马铃薯(块茎)24 t/hm^2 以上,肥料对马铃薯(块茎)的增产效应分别为每百千克有机肥增产 5.8～8.0kg,每千克 N 增产 28.2～40.3kg、千克磷(P_2O_5)增产 3.3～15.2 kg。

参考文献:

[1] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[J]. 土壤学报,2002,39(增刊):3-11.
Zhu Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (Supp.): 3-11.

[2] Godwin D C, Jones C A. Nitrogen dynamics in soil-plant systems [A]. Hanks R J, Ritchie J T (Eds.). Modeling plant and soil systems [M]. Madison, Wisconsin: ASA-CSSA-SSSA, 1991. 439-455.

[3] Peng S, Cassman K G. Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated nitrogen fertilizer efficiencies in irrigated rice[J]. Agron. J., 1998, 90: 178-185.

[4] Benbi D K. Nitrate distribution and accumulation in an ustochrept soil profile in a long term fertilizer experiment[J]. Fertilizer Research, 1996, 28: 173-177.

[5] 段建南,王改兰. 土壤培肥途径研究[A]. 张维邦. 黄土高原整治研究[M]. 北京:科学出版社,1992.158-176.
Duan J N, Wang G L. On the way for soil fertilization [A]. Zhang W B. Management of the Loess Plateau Region [M]. Beijing: Science Press, 1992.158-176.

[6] 段建南,王改兰,李拴怀,等. 黄土丘陵土壤培肥效应的研究[A].中国科协首届青年学术年会执行委员会. 中国科学技术协会首届青年学术年会论文集—农科分册[C]. 北京:中国科学技术出版社,1992. 342-347.
Duan J N, Wang G L, Li S H *et al*. Effects of fertilization on soils in loess hill[A].CAST. China association for science and technology first academic annual meeting of youths proceedings[C]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992. 342-347.

[7] 李旭霖,段建南. 黄土丘陵区栗褐土定位连续施肥效应[J]. 水土保持通报,1996,16(4):41-45.
Li X L, Duan J N. Effects of consecutive fertilization on chestnut-cinnamon soils of Loess Hill Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16 (4): 41-45.

[8] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京:科学出版社,1992.
Yang W Z, Yu C Z. Regional management and evaluation in the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1992.

[9] 余存祖,徐福利,兰晓泉,等. 土壤生态系统养分循环与平衡的研究[A]. 杨文治,等. 土地资源及生产力研究[C]. 北京:科学技术文献出版社,1990.162-168.
Yu C Z, Xu F L, Lan X Q *et al*. Studies on nutrient cycling and balance in soil ecosystem[A]. Yang W Z *et al*. Study on land resources and productivity[C]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1990. 162-168.

[10] 高炳德. 马铃薯营养特性研究[J]. 马铃薯,1984(3):3-13.
Gao B D. Study on the characteristics of the potato nutrition[J]. Potato, 1984 (3): 3-13.

[11] 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社,1998.
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer problems on China sustainable development of agriculture [M]. Nanchang: Scientific and Technical Publishing House of Jiangxi, 1998.

[12] 鲁如坤. 土壤—植物营养学原理和施肥[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
Lu L K. Principles of soil-plant nutrition and fertilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.

[13] 段建南,王改兰,李拴怀,等. 糜子施肥数学模型研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),1990(增刊):78-83.
Duan J N, Wang G L, Li S H *et al*. A study on the mathematical model of fertilizer application for millet[J]. Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.), 1990 (Supp.): 78-83.

[14] 段建南,王改兰,李拴怀,等. 黄土高原砖窑沟试验区土壤资源与改良利用途径[J]. 自然资源学报,1994,9(3):253-259.
Duan J N, Wang G L, Li S H *et al*. Study on soil resources and the way for its amelioration and utilization in Zhuanyaogou experiment area of the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 1994, 9 (3): 253-259.