

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.017

渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究*

刘芬¹ 王小英¹ 赵业婷¹ 同延安^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 利用20世纪80年代第二次全国土壤普查资料和2010—2012年耕地地力调查与质量评价项目数据,运用经典统计学、地统计学结合GIS技术,分析了渭北旱塬近30年来土壤养分变化;并通过对该区测土配方施肥项目农户施肥调查数据的分析,明确了该区农户施肥现状及主要种植体系养分平衡状况。结果表明,渭北旱塬当前土壤有机质、碱解氮和有效磷含量平均分别为12.9 g/kg、59.4 mg/kg和15.4 mg/kg,与20世纪80年代相比,分别提高了22.0%、37.9%和129.8%;速效钾基本保持不变。该区氮、磷肥过量投入现象严重,小麦、玉米和苹果的氮肥、磷肥投入过量农户分别占总调查农户的89%、69%、74%和75%、49%、52%;76%和67%的农户在小麦和玉米田间的钾肥投入不足,苹果钾肥投入过量和不足的农户比例均较高,分别为40%和48%。小麦、玉米和苹果三大主要种植体系土壤氮、磷均处于盈余状态,氮盈余量平均分别为116、111和655 kg/hm²,磷盈余量平均分别为88、56和357 kg/hm²,其实际盈余率均大大超出短期内允许的盈余范围。小麦和玉米种植体系钾素均为亏损状态,其亏损量平均分别为73和93 kg/hm²,在允许亏损范围内;而苹果种植体系钾素年盈余量高达283 kg/hm²,实际盈亏率较允许平衡盈亏率高出145个百分点。因此,为实现渭北旱塬粮食安全和环境安全的双重目的,今后该区域应适量减少氮、磷肥的投入,尤其是苹果园区;增加粮食作物的钾肥投入,以保证作物稳产、高产,保持地力。

关键词: 渭北旱塬 土壤养分 养分平衡

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0110-10

Spatial and Temporal Variation of Soil Nutrient and Nutrient Balance Status in Weibei Rainfed Highland

Liu Fen¹ Wang Xiaoying¹ Zhao Yeting¹ Tong Yan'an^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Better understanding of soil fertility and nutrient balance in soil-crop systems is important for rational fertilization, refining agricultural management practices and improving utilization efficiency of water, soil and fertilizer resources. Traditional statistics, geostatistics combined with GIS technology were used to evaluate the spatial and temporal variability of soil organic matter (OM), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) in Weibei rainfed highland from the 1980s to 2010—2012 based on the data from the second national soil survey and the cultivated land productivity investigation and quality evaluation project. Meanwhile, the current situation of fertilization and nutrient balance in main cropping systems was analyzed based on the information from household surveys of the national soil testing and fertilizer recommendation project during 2010 to 2012. The results indicated that the current average contents of OM, AN, AP and AK in soil were 12.9 g/kg, 59.4 mg/kg, 15.4 mg/kg and 164.2 mg/kg, respectively. Compared with 1980s, the OM, AN and AP contents in soil

收稿日期: 2014-10-28 修回日期: 2014-11-25

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD05B03)

作者简介: 刘芬, 博士生, 主要从事施肥与环境研究, E-mail: liufen@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 同延安, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与土壤学研究, E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

have been increased by 22.0%, 37.9% and 129.8%, respectively, and AK kept stable. Compared with the rational fertilizer application rates, the ratios of households using excessive nitrogen (N) inputs in wheat, maize and apple were 89%, 69% and 74%, and the ratios for phosphorus (P) were 75%, 49% and 52%, respectively. The ratios of households using insufficient potassium (K) inputs in wheat and maize were much higher, which were 76% and 67%, respectively. Meanwhile, the ratios of households using excessive and insufficient K inputs in apple were 40% and 48%, respectively. Significant surpluses of N and P in wheat, maize and apple cropping systems were observed, with an average of 116, 111 and 655 kg/hm² for N, 88, 56 and 357 kg/hm² for P, respectively. N and P practical surplus rates were much higher than their permissible surplus rates, indicating that N and P surpluses in this area were greatly exceeded their rational ranges. K was in deficit in wheat and maize cropping systems, with an average deficit of 73 and 93 kg/hm², respectively, which were both within their permissible scopes. K was in surplus in apple cropping system, with an average of 283 kg/hm², which was 145 percentage points higher than its permissible surplus rate. From the perspective of food safety and environmental protection, inputs of N and P in this area should be reduced. By contrast, input of K should be increased to maintain high and stable cereal crop yields.

Key words: Weibei rainfed highland Soil nutrient Nutrient balance

引言

土壤是一个时空连续的变异体^[1],土壤养分是土壤的本质属性。对土壤养分时空变异的研究是科学施肥、合理种植和提高水土资源利用效率的有效依据^[2]。农田养分平衡的本质是养分被作物消耗和施肥投入之间的平衡^[3],其盈亏是农田土壤养分时空变化的主要驱动因素^[4],对区域主要种植体系农田养分平衡的研究有助于从宏观上了解农田土壤养分水平的发展趋向,是实现农业可持续发展的基础^[5]。我国曾于20世纪50年代和80年代进行过两次全国性土壤普查,摸清了当时我国土壤养分基本状况,之后再没有开展大范围的普查工作。渭北旱塬是陕西省重要的粮果生产基地,自20世纪80年代以来,该区种植业结构不断调整,以苹果为代表的经济作物种植比例明显增加,其农田系统养分输入、输出也发生了明显变化,因此,为实现区域养分高效利用,急需摸清当前该区土壤养分及主要种植体系养分投入、产出状况。

目前对于不同区域尺度上土壤养分变化和农田养分平衡的研究已有很多。任意等^[6]利用全国190个土壤质量监测点20多年来的土壤养分观测数据,对我国不同地区土壤养分差异及变化趋势进行了研究,指出我国不同地区土壤有效磷含量均呈稳中有升的趋势,其他土壤养分指标各地区间存在一定差异。李书田等^[7]对我国不同区域农田养分输入、输出与平衡的研究指出,各地区氮、磷均盈余,全国平均盈余量分别为60.7和59.2 kg/hm²;钾素的情况与氮、磷不同,全国钾素输入与输出基本持平。

Chen等^[8-13]则针对我国部分典型县域土壤养分变化或农田养分平衡进行了深入研究。上述研究均着眼于土壤养分或农田养分投入、产出的某一方面。本文通过对区域土壤养分变化、农户施肥现状及主要种植体系氮、磷、钾养分平衡三方面的综合研究,为该区域养分资源综合利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

渭北旱塬位于陕北丘陵沟壑区南部,关中平原北部,北纬34°29'~36°24',东经106°26'~110°37'之间,总面积约3.62万km²。行政区域包括宝鸡、咸阳、渭南、铜川、延安5地(市)中的23个县(市、区)^[14],其基本地貌类型为黄土台塬,海拔高度299~2453m,主要土壤类型为黄绵土和黑垆土;该区属暖温带半湿润易旱区,年均气温9~13℃,年降水量500~600mm,年日照时数1900~2533h,无霜期140~224d。主要粮食作物为冬小麦和春玉米,种植制度为一年一熟;主要经济作物为苹果。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤养分数据

本研究共收集2个时期耕地土壤养分数据。20世纪80年代和2010—2012年数据分别来自全国第二次土壤普查资料和国家耕地地力调查与质量评价项目。2个时期采样方法一致,在作物收获后、施肥前,根据地形地貌、土壤性质等因素特点,以全面性、均衡性、客观性和可比性为原则,确定采样单元。每一采样单元选取有代表性的田块,用不锈钢土钻等工具,在0~20cm土层采用“S”形法均匀随机取

6~8个点,将各采样点土壤混匀后用四分法留取1 kg土样装袋以备分析。20世纪80年代由于科技水平的限制,未采用GPS定位采样点,共采集土样13 046个。2010—2012年采用GPS定位仪确定样点经纬度及海拔高度,共采集土样102 350个,采样点位置如图1所示。图中:大地坐标系:2000国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System

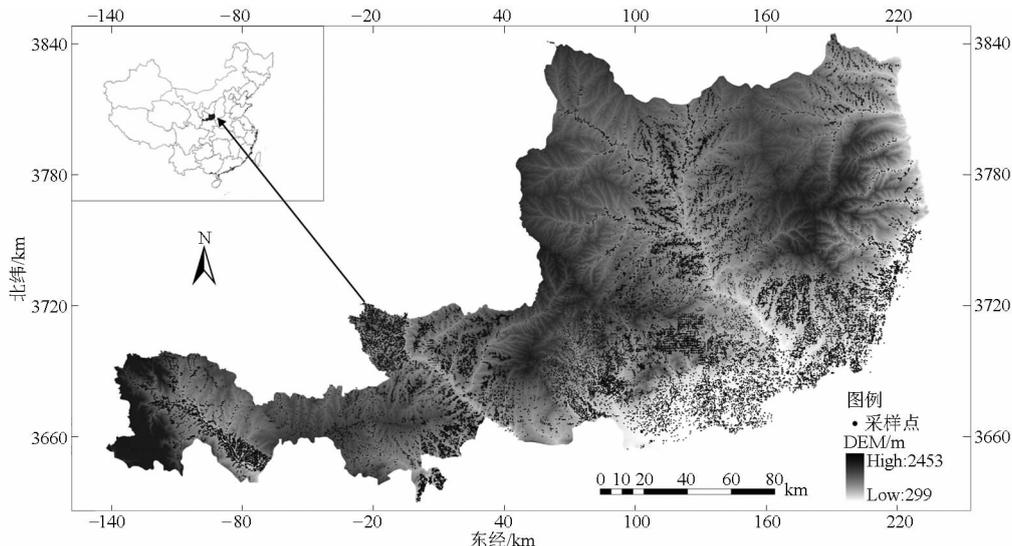


图1 渭北旱塬2010—2012年土壤样点分布

Fig.1 Distribution of soil sampling sites in Weibei rainfed highland in 2010—2012

1.2.2 养分平衡数据

养分平衡计算中输入项(化肥和有机肥)数据来自2010—2012年国家测土配方施肥项目陕西省农户施肥调查信息。研究区域各县每年选取具有代表性的自然村,由农技推广人员随机选取农户进行调查,调查内容主要包括:作物品种、作物产量、肥料品种、施肥量和施肥时期等。小麦品种主要为晋麦47和长旱58等;玉米品种主要为中科4号和豫玉22号等;苹果为8~15 a的成龄盛果期树,品种主要为红富士。本区域小麦、玉米和苹果分别得到有效调查户数为7 348、5 198和3 752户。

1.3 数据处理

1.3.1 土壤养分数据

异常值的存在和数据非正态分布易引起变异函数的比例效应,增加估计误差,故采用 $X \pm 3\sigma$ 法剔除异常值^[17],2010—2012年最终保留的有效样点数有机质为101 634个,碱解氮101 429个,有效磷101 531个,速效钾101 582个。在该方法中, X 为研究变量原始数据平均值, σ 为标准差。与此同时,采用对数转换和BOX-COX转换,对异常值剔除后的数据进行转换以及Kolmogorov-Smirnov单样本正态检验(K-S检验),并采用普通克里格法对当前采样点进行空间插值。对20世纪80年代养分分级图^[18]进行数字化。

2000);投影坐标系:双标准纬线等面积圆锥投影,中央经线108°E,双标准纬线33°N、38°N,投影参数参照《陕西省基本地理省情》^[16]。

2个时期土壤样品采用相同方法测定,有机质为油浴加热-重铬酸钾容量法,碱解氮为碱解扩散法,有效磷为0.5 mol/L碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,速效钾为1 mol/L乙酸铵提取-火焰光度法^[15]。

1.3.2 养分平衡参数选择及计算方法

采用差减(输入项与输出项之差)法估算农田养分平衡状况,其中输入项为化肥和有机肥投入的养分量。化肥依据调查农户施肥包装袋上标识的养分含量计算;有机肥养分含量按照《中国有机肥料养分志》提供的标准值计算^[19]。输出项为收获物养分带走量,根据作物产量和单位经济产量养分吸收量估算。调查区作物产量按照农户实际调查值计算;大量研究指出,作物(秸秆和子粒)养分含量是一项比较粗略的参数,随作物品种、气候、施肥状况等的不同而有较大的波动,但可供较大范围内区域农业养分收支估算之用^[3]。本研究小麦、玉米和苹果每100 kg经济产量所吸收的氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)养分量分别按2.58、1.10和2.92 kg,2.20、0.85和2.42 kg^[20],0.80、0.56和0.64 kg^[21]计算。

1.3.3 养分平衡评价方法

对于一个地区而言,农田养分不一定必须要达到100%的平衡。例如,在施肥不增产的地区,一定要通过施肥来达到土壤养分平衡只会造成养分资源的严重浪费,作物产量并不会显著提高,可允许有净的平衡赤字。本研究采用鲁如坤等^[22]提出的“养分允许平衡盈亏率”方法对农田养分平衡状况进行评价。养分允许平衡盈亏率,是指当地条件下养分平衡计算结果允许的亏缺或盈余,即养分亏缺时并不

会影响作物产量,盈余时也不致造成养分浪费。其计算式为

$$B = \left(\frac{1-S}{E} - 1 \right) \times 100\%$$

其中 $S = \frac{1}{D} \times 100\%$

式中 B ——某养分允许盈亏率

S ——土壤养分贡献率,指不施某一养分时作物产量相当于全肥产量的百分比

E ——某养分肥料利用率,用相对值表示,如肥料利用率为30%,则用相对值0.3表示

D ——某养分平均增产率,用相对值表示,如增产率为30%,则 $D = 1 + 30\% = 1.3$

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化

由表1可以看出,渭北旱塬当前土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量平均分别为12.9 g/kg、59.4 mg/kg、15.4 mg/kg和164.2 mg/kg。与20世纪80年代(陕西省全国第二次土壤普查土壤采样时间为1979—1985年)相比,有机质、碱解氮和有效磷均有较大幅度的增加,分别提高2.3 g/kg、16.3 mg/kg和8.7 mg/kg,增幅为22.0%、37.9%和129.8%;速效钾基本保持不变。30 a来随着农作物品种的改良以及肥料的大量施用,作物生物学产量随之增多,作物根系、残茬等归还于土壤中的量不断

增加,同时,农业机械化作业程度的提高促进了秸秆还田的推行,使得大量的有机物质进入土壤^[23],导致土壤中有机质及其他养分含量提高。2个时期各项土壤养分指标变异系数介于32%~85%之间,均属于中等变异强度,且2个时期均以有效磷的变异程度最高,这与大多数研究结果相一致^[2]。

2010—2012年渭北旱塬土壤养分最优半方差函数理论模型及其参数见表2。按照陕西省第二次土壤普查土壤养分分级标准^[18]绘制当前土壤养分分级图,并对第二次土壤普查时期的养分分级图^[18]进行数字化(图2),同时统计2个时期各等级面积比例(图3)。由图2可以看出,近30 a来,本研究区域北部原土壤有机质含量较高的区域出现不同程度的下降,而中部区域原低值区土壤养分显著提高,南部区域变化趋势不一致。总体来讲,与20世纪80年代相比,当前土壤有机质含量小于8 g/kg和大于20 g/kg的面积比例都在减小,67.6%的土壤有机质含量集中在10~15 g/kg之间(图3),说明土壤有机质含量正在向区域均匀化方向发展。土壤碱解氮呈现与有机质相同的变化趋势。出现这种现象主要是因为碱解氮既包括无机的矿物氮,还包括部分有机质中易分解的、比较简单的有机态氮,是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮的总和,其含量与有机质含量呈显著正相关关系^[24]。当前本研究区域土壤碱解氮整体集中于45~90 mg/kg之间(占整个研究区域面积的83.1%),小于45 mg/kg和大于90 mg/kg的面积比例都在减少。

表1 近30 a渭北旱塬土壤养分含量变化情况

Tab.1 Changes of soil nutrients content in Weibei rainfed highland during the past 30 years

土壤养分指标	时期	平均值	标准差	变异系数/%	变化率/%
有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	1979—1985年	10.6	4.4	41.0	
	2010—2012年	12.9	4.3	33.6	22.0
碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	1979—1985年	43.1	14.4	33.5	
	2010—2012年	59.4	22.9	38.6	37.9
有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	1979—1985年	6.7	5.7	85.1	
	2010—2012年	15.4	9.3	60.6	129.8
速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	1979—1985年	161.1	51.3	31.8	
	2010—2012年	164.2	58.2	35.4	1.9

注:1979—1985年数据来自陕西省全国第二次土壤普查资料——陕西省第二次土壤普查数据集^[25]。

表2 2010—2012年渭北旱塬土壤养分最优半方差函数理论模型及其参数

Tab.2 Parameters fitted by semi-variogram models for soil nutrient parameters in Weibei rainfed highland in 2010—2012

指标	最优模型	变程/km	块金值	基台值	块金系数	M_{SE}	A_{SE}	R_{MSE}	R_{MSSE}
有机质	指数	60.45	0.06	0.09	0.65	0.010	3.15	3.49	0.90
碱解氮	指数	53.34	0.31	0.45	0.69	0.005	19.28	18.97	0.99
有效磷	指数	50.97	0.48	0.64	0.74	0.001	8.01	7.93	1.11
速效钾	指数	47.41	0.10	0.12	0.79	0.009	50.30	51.40	0.93

注: M_{SE} 为标准化平均误差; A_{SE} 为平均标准误差; R_{MSE} 为均方根误差; R_{MSSE} 为标准化均方根误差。

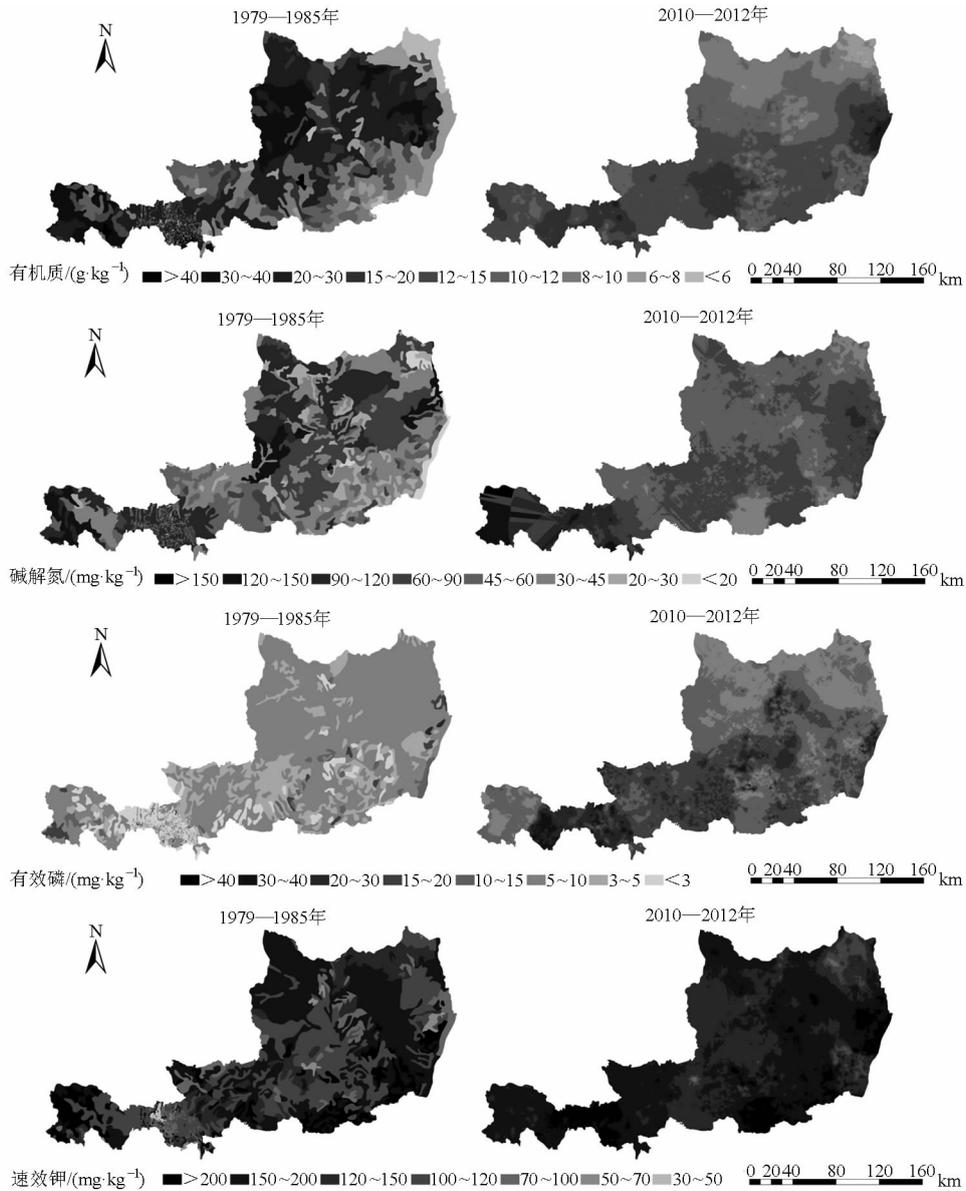


图2 渭北旱塬不同时期土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾空间分布图

Fig.2 Distribution map of soil OM, AN, AP and AK in two periods in Weibei rainfed highland

与20世纪80年代相比,土壤有效磷含量在本研究区域整体上表现出不同程度的上升。20世纪80年代有效磷含量小于 10 mg/kg 的土壤占总面积的95.9%,而当前小于 10 mg/kg 的土壤仅占20.9%,65.5%的土壤集中在 $10\sim20\text{ mg/kg}$ 之间。土壤速效钾含量表现为南部区域有不同程度的提高,而其他区域变化趋势不一致,有增有减。整体上,与20世纪80年代相比,当前速效钾含量小于 120 mg/kg 的土壤比例有所减少,大于 200 mg/kg 的土壤比例变化幅度不大。

2.2 作物肥料投入状况

根据农户施肥调查数据,分析该区域农户不同作物肥料施用情况。由表3可以看出,苹果作为该区域主要经济作物,由于经济收益较高,导致其肥料投入量远高于粮食作物(小麦、玉米)。这与闫湘的

研究结果相一致,即氮、磷、钾肥总养分在不同作物上投入的比较优势(每1%的作物面积所施用的肥料的百分数,表明肥料更倾向于投向何种作物)为:果树>蔬菜>经济作物>粮食作物^[26]。小麦氮(N)、磷(P_2O_5)、钾肥(K_2O)投入量(化肥+有机肥)平均分别为226、135和 52 kg/hm^2 ,其比例为1:0.60:0.23;玉米平均分别为267、116和 78 kg/hm^2 ,比例为1:0.43:0.29;苹果平均分别为894、524和 474 kg/hm^2 ,比例为1:0.59:0.53。苹果钾肥投入比例远高于小麦和玉米。分析养分来源可以看出,3种作物化肥所提供的氮、磷养分均远高于有机肥,而钾素主要来源于有机肥。小麦、玉米和苹果有机肥提供的养分量(N+ P_2O_5 + K_2O)占肥料总养分的比例分别为23%、25%和36%,可见农户将更多的有机肥投入到经济作物上。

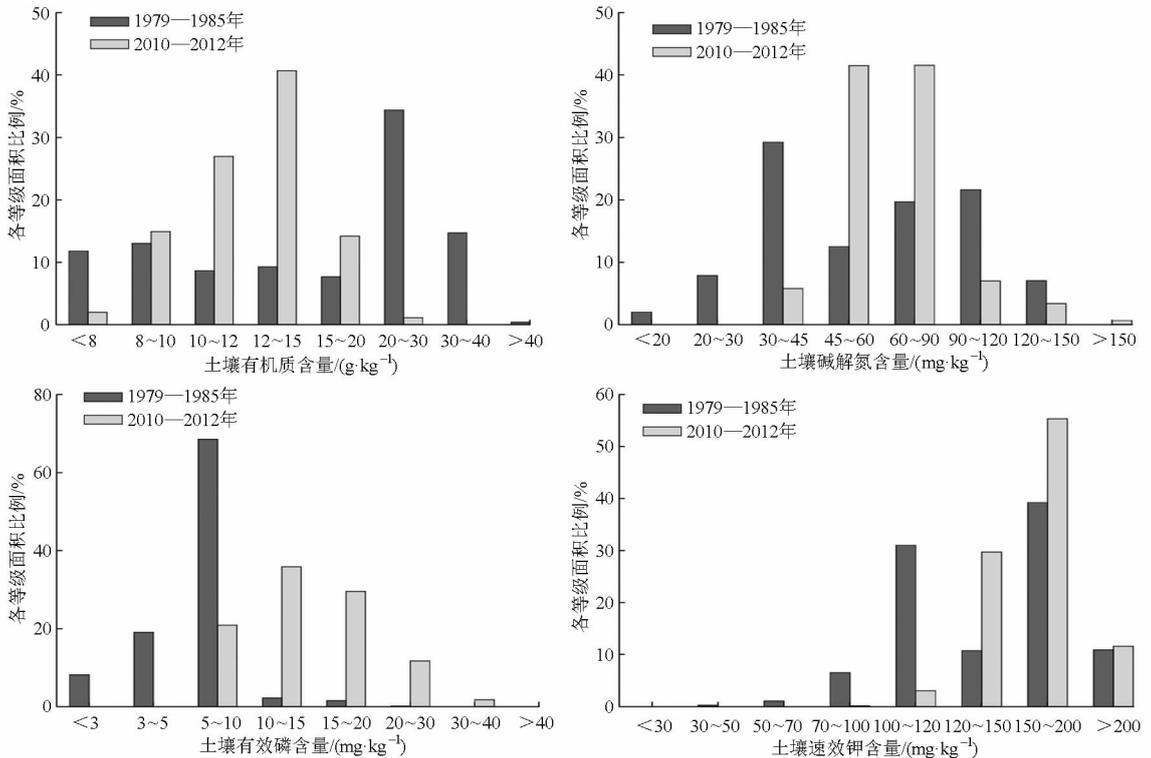


图 3 渭北旱塬不同时期土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾各等级面积比例

Fig. 3 Percentages of areas in different ranges of soil fertility parameters in two periods in Weibei rainfed highland

根据王小英等^[27-28]在已有试验研究和调查结果的基础上制定出的合理施肥标准值(表 4),对渭北旱塬农户养分投入状况进行总体评价。由图 4 可知,渭北旱塬小麦、玉米和苹果氮肥投入合理的农户占总调查农户数的比例分别为 7.9%、21.6% 和 16.6%,而投入偏高的农户比例分别高达 89.4%、69.3% 和 74.2%,说明该区域氮肥投入过量现象非常严重,这也是我国当前农业生产中存在的普遍现象^[29]。刘芬等^[30-31]对渭北旱塬小麦和玉米的研究指出,过量施氮作物产量不会增加,而且经济收益和肥料利用效率均会显著降低。Ju 等^[32]对我国集约化种植体系氮肥用量的研究表明,氮肥用量降低 30%~60%,作物产量并不会显著降低。过量施氮不仅严重浪费了资源,同时过量的氮素会通过气体和硝酸盐的形式进入大气和地下水,对环境造成潜在威胁。Liu 等^[33]研究指出,自 20 世纪 80 年代以来大量施氮导致我国氮沉降量增加了约 8 kg/hm²。同时,Guo 等^[34]研究指出,过去 30 a 我国农田土壤 pH 值平均下降了约 0.5 个单位,出现显著酸化现象,而氮肥过量施用是导致农田土壤酸化的最主要原因。除此,过量施氮还会导致土壤硝酸盐大量累积,污染地下水^[35]。Zhang 等^[36]指出每吨氮肥从生产、运输到施用过程共排放约 13.5 t 等当量 CO₂。根据作物种植面积和单位面积氮肥过量施用量,渭北旱塬小麦、玉米和苹果仅过量投入的氮肥所产生

的 CO₂就高达 41 万 t。

表 3 渭北旱塬小麦、玉米和苹果肥料投入量

Tab. 3 Fertilizer application rates of wheat, maize and apple in Weibei rainfed highland kg/hm²

作物	氮 (N)		磷 (P ₂ O ₅)		钾 (K ₂ O)	
	化肥	有机肥	化肥	有机肥	化肥	有机肥
小麦	185 ± 83	41 ± 217	112 ± 55	23 ± 99	23 ± 34	29 ± 111
玉米	223 ± 91	44 ± 185	88 ± 51	28 ± 82	35 ± 39	43 ± 149
苹果	587 ± 301	307 ± 541	362 ± 176	162 ± 195	255 ± 207	219 ± 255

表 4 渭北旱塬小麦、玉米和苹果合理施肥量

Tab. 4 Rational fertilizer application rates of wheat, maize and apple in Weibei rainfed highland

作物	氮 (N)		磷 (P ₂ O ₅)		钾 (K ₂ O)	
	化肥	有机肥	化肥	有机肥	化肥	有机肥
小麦	70 ~ 105		60 ~ 90		45 ~ 75	
玉米	115 ~ 170		65 ~ 90		45 ~ 75	
苹果	240 ~ 360		220 ~ 340		160 ~ 240	

该区小麦、玉米和苹果磷肥投入合理的农户比例分别为 13.2%、11.8% 和 26.8%,而投入偏高的农户比例分别高达 74.8%、49.1% 和 51.6%,说明该区域磷肥存在投入过量现象。磷肥生产需要消耗大量的资源,而磷矿作为主要原材料,是一种不可再生资源,具有耗竭性。目前全球可开采的磷矿资源非常有限,而我国磷矿资源也存在丰而不富、分布偏远、难以开采、品位低下、难以为继的现状^[37]。过量

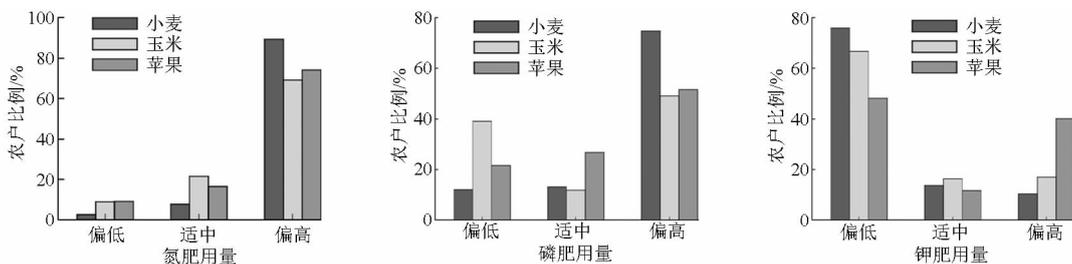


图4 渭北旱塬小麦、玉米和苹果氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥投入比例

Fig. 4 Distribution of N, P_2O_5 and K_2O inputs ratio at different levels on wheat, maize and apple in Weibei rainfed highland

施磷导致磷矿资源大量浪费,同时,磷肥生产过程中会产生大量的废气、废水和废渣,对土壤酸化、水体富营养化和烟尘、粉尘排放等环境问题影响极大^[38]。除此,过量施磷还会导致土壤磷素大量积累,使得农田磷的环境风险增大^[39]。

该区小麦、玉米和苹果钾肥投入合理的农户比例均不足20%,而小麦和玉米投入不足比例分别高达75.9%和66.7%,苹果过量和不足比例均较高,分别为40.1%和48.2%。大量研究表明,合理施用钾肥作物增产、增收效果显著,且与20世纪80年代相比,当前钾肥肥效明显提高^[30-31]。

2.3 土壤养分平衡状况及评价

根据农户施肥调查数据,该区小麦、玉米和苹果产量平均分别为($4\ 270 \pm 1\ 153$)、($7\ 078 \pm 2\ 155$)和($29\ 835 \pm 10\ 153$) kg/hm^2 。根据每100 kg经济产量养分吸收量可估算小麦氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)养分吸收量平均分别为110、47和125 kg/hm^2 ,玉米为156、60和171 kg/hm^2 ,苹果为239、167和191 kg/hm^2 。

根据养分输入、输出量计算得到不同种植体系氮、磷、钾养分平衡状况(图5)。由图5可以看出,渭北旱塬区小麦、玉米和苹果三大主要种植体系氮、磷养分均处于盈余状态,其中氮盈余量平均分别为116、111和655 kg/hm^2 ,磷盈余量平均分别为88、56和357 kg/hm^2 。Cao等^[40]研究指出土壤速效磷含量与磷盈余量呈极显著正相关,每100 kg/hm^2 磷盈余可使我国土壤有效磷水平提高1.44~5.74 mg/kg 。因此,从土壤养分角度来讲,氮、磷盈余有利于土壤养分的提高,这与上述土壤养分上升的变化趋势相符。不同种植体系钾素平衡状况不同。小麦和玉米种植体系钾素均为亏缺状态,其亏缺量平均分别为73和93 kg/hm^2 ,而苹果体系则表现为钾盈余,年盈余量平均高达283 kg/hm^2 ,这是由于苹果年收获带走的钾量比较少,而有机肥和化肥所投入的钾量很高。本研究区苹果种植面积高达40多万 hm^2 ,各个县域均有分布,且整个区域23个县(市、区)中有20个属于陕西省苹果种植基地县,苹果种植体系带来的

钾素盈余完全能够弥补粮食作物体系造成的钾素亏缺,从而导致整个研究区域土壤速效钾含量平均水平并没有发生较大变化。

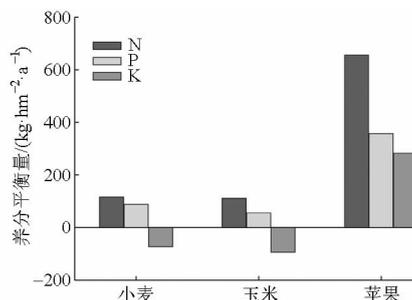


图5 渭北旱塬主要种植体系养分平衡状况

Fig. 5 Nutrient balance in main cropping systems in Weibei rainfed highland

根据养分允许平衡盈亏率方法对渭北旱塬主要种植体系养分平衡状况进行评价。由表5可知,渭北旱塬小麦、玉米和苹果种植体系氮素允许盈亏率分别为-17.6%、-9.4%和0.2%,说明小麦和玉米在氮素分别有17.6%和9.4%的赤字情况下并不影响产量,是短期允许范围内的赤字。而该区小麦、玉米和苹果种植体系氮素实际盈亏率分别高达105.2%、71.5%和328.1%,较其允许平衡盈亏率

表5 渭北旱塬主要种植体系养分允许和实际平衡盈亏率

Tab. 5 Permissible and practical surplus or deficit rates of nutrient balance in main cropping systems in Weibei rainfed highland

作物	养分	相对产量 <i>D</i>	肥料利用 率 <i>E</i> /%	允许盈亏 率 <i>B</i> /%	实际盈亏 率/%
小麦	N	1.30	28	-17.6	105.2
	P	1.19	12	32.5	187.5
	K	1.10	31	-72.0	-58.3
玉米	N	1.34	28	-9.4	71.5
	P	1.13	12	-4.3	92.8
	K	1.08	31	-76.4	-54.5
苹果	N	1.39	28	0.2	328.1
	P	1.27	12	77.2	401.8
	K	1.26	31	-33.4	111.8

注:小麦、玉米和苹果相对产量值均为本研究区域多年多点试验的平均值,引自文献[30-31,42];肥料利用率取值于文献[43];实际平衡盈亏率是土壤-作物体系养分盈亏量与养分支出量的比值。

分别高出 123.81 和 328 个百分点,大大超出了合理的范围,可能会造成环境问题,故应减少投入量,尤其是苹果园区。

该区小麦、玉米和苹果种植体系磷素允许盈亏率分别为 32.5%、-4.3% 和 77.2%,说明小麦和苹果种植体系磷素在短期内一定量的盈余不会对周边环境产生影响。而该区小麦、玉米和苹果种植体系磷素实际盈亏率分别高达 187.5%、92.8% 和 401.8%,较其允许平衡盈亏率分别高出 155、97 和 325 个百分点。鲁如坤等^[22]认为,当磷肥增产率在 10%~25% 时,磷平衡应有适量的盈余,但应控制在 20% 之内。由此可见,本研究区域磷肥用量明显偏高,应减少投入量。

该区小麦和玉米种植体系钾素实际盈亏率分别为 -58.3% 和 -54.5%,在允许亏缺范围内(允许盈亏率分别为 -72.0% 和 -76.4%),这也是本研究区域土壤速效钾含量并没有发生较大变化的重要原因。何园球等^[41]认为,为了保护土壤养分,除非资金不足或肥料缺乏等特殊情况下可以短期有允许平衡盈亏率范围内的赤字,土壤-作物系统养分应基本保持平衡,因此该区域小麦和玉米种植中应增加钾肥投入,以保证作物稳产、高产。而本研究区苹果种植体系钾素实际盈亏率高达 111.8%,较允许平衡盈

亏率高出 145 个百分点,说明该区苹果钾肥投入过多,主要是由于本研究区域是陕西省苹果优生区,农民为追求经济收益,几乎将全部有机肥都作为底肥施用到果树上(表 3),但是在后期追肥时完全没有考虑有机肥所提供的养分,依然投入大量的化肥,从而导致氮、磷、钾实际盈余率均远高出短期允许的合理范围。

3 结束语

30 a 来,渭北旱塬土壤肥力有了很大的提升,土壤有机质和碱解氮表现出区域均匀化方向发展的趋势,有效磷在整个研究区域均呈上升趋势,速效钾各区域变化趋势不一致。该区小麦、玉米和苹果氮、磷肥过量投入现象严重,绝大多数农户小麦和玉米钾肥投入不足,苹果钾肥投入过量和不足并存。小麦、玉米和苹果三大主要种植体系氮、磷均处于盈余状态,且大大超出了短期内允许的盈余范围。不同种植体系的钾素平衡状况不同,小麦和玉米种植体系均表现为亏缺状态,而苹果种植体系则表现为钾盈余。为实现渭北旱塬粮食安全和环境安全的双重目的,今后该区域施肥中应适量减少氮、磷肥的投入,尤其是苹果园区;增加粮食作物的钾肥投入,以保证作物稳产、高产,保持地力。

参 考 文 献

- 司涵,张展羽,吕梦醒,等. 小流域土壤氮磷空间变异特征分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 90-96.
Si Han, Zhang Zhanyu, Lü Mengxing, et al. Spatial variability of soil nitrogen and phosphorus in small watershed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 90-96. (in Chinese)
- 崔潇潇,高原,吕貽忠. 北京市大兴区土壤养分的空间变异[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 327-333.
Cui Xiaoxiao, Gao Yuan, Lü Yizhong. Spatial variability of soil fertility in Daxing District of Beijing [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 327-333. (in Chinese)
- 黄绍文,金继运,左余宝,等. 黄淮海平原玉田县和陵县试区粮田土壤养分平衡现状评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 137-143.
Huang Shaowen, Jin Jiyun, Zuo Yubao, et al. Evaluation of agricultural soil nutrient balance for Yutian County and Lingxian experimental area in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 137-143. (in Chinese)
- 孙波,潘贤章,王德建,等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤养分时空演变的影响[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1201-1208.
Sun Bo, Pan Xianzhang, Wang Dejian, et al. Effect of nutrient balance on spatial and temporal change of soil fertility in different agriculture area in China [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11): 1201-1208. (in Chinese)
- 齐伟,徐艳,张凤荣. 黄淮海平原农区县域土壤养分平衡评价方法及其应用[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 238-243.
Qi Wei, Xu Yan, Zhang Fengrong. Study on evaluation methods of soil nutrient balance and application at county level in Huang-huai-hai Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(2): 238-243. (in Chinese)
- 任意,张淑香,穆兰,等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 13-17.
Ren Yi, Zhang Shuxiang, Mu Lan, et al. Change and difference of soil nutrients for various regions in China [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(6): 13-17. (in Chinese)
- 李书田,金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.
Li Shutian, Jin Jiyun. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207-4229. (in Chinese)
- Chen J, Yu Z, Ouyang J, et al. Factors affecting soil quality changes in the North China Plain: a case study of Quzhou County [J]. Agricultural System, 2006, 91(3): 171-188.
- Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China [J]. Geoderma, 2003, 115(1-2): 85-99.

- 10 Darilek J L, Huang B, Wang Z, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1-3): 286-292.
- 11 孔祥斌, 张凤荣, 王茹, 等. 基于GIS的城乡交错带土壤养分时空变化及格局分析——以北京市大兴区为例[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2210-2218.
Kong Xiangbin, Zhang Fengrong, Wang Ru, et al. GIS based analysis of spatial-temporal distribution of soil nutrients in a suburb region: a case study of the Daxing district in Beijing City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2210-2218. (in Chinese)
- 12 Huang S W, Jin J Y, Bai Y L, et al. Evaluation of nutrient balance in soil-vegetable system using nutrient permissible surplus or deficit rate [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(7-8): 959-974.
- 13 甄兰, 崔振岭, 陈新平, 等. 25年来种植业结构调整驱动的县域养分平衡状况的变化——以山东惠民县为例[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 213-222.
Zhen Lan, Cui Zhenling, Chen Xinping, et al. The changes of nutrient balances driven by adjusting crop structure at county level during 25 years—a case study in Huimin County, Shandong Province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 213-222. (in Chinese)
- 14 洪晓强. 渭北旱作农业节水增效的途径[J]. *中国水土保持*, 2011(6): 35-37.
Hong Xiaoqiang. Ways of water conservation and efficiency improvement of dry farming in Weibei [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(6): 35-37. (in Chinese)
- 15 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 16 陕西省地理(国)省情监测工作领导小组领导小组办公室. 陕西省基本地理省情[R]. 2011.
- 17 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 554-564.
Chen Tao, Chang Qingrui, Liu Jing, et al. Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable lands of Heyang County in South Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 554-564. (in Chinese)
- 18 陕西省第二次土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- 19 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- 20 赵营. 冬小麦/夏玉米轮作体系下作物养分吸收利用与累积规律及优化施肥[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
Zhao Ying. Nutrients uptake, utilization, accumulation and optimize fertilization under the winter wheat/summer maize rotation system [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- 21 温树英. 红富士苹果规范化管理技术要点[J]. *北方果树*, 1993(1): 31-33.
- 22 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究IV. 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. *土壤通报*, 1996, 27(5): 197-199.
- 23 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 140-148.
Zhao Yeting, Chang Qingrui, Li Zhipeng, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei tableland area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 140-148. (in Chinese)
- 24 王艳杰, 付桦. 雾灵山地区土壤有机质全氮及碱解氮的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 85-90.
Wang Yanjie, Fu Hua. The relationships among organic matter, total nitrogen and alkaline nitrogen of soil in Wuling Mountain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Supp.): 85-90. (in Chinese)
- 25 陕西省土壤普查办公室. 陕西省第二次土壤普查数据集[DB]. 1991: 415-420.
- 26 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
Yan Xiang. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2008. (in Chinese)
- 27 王小英, 同延安, 刘芬, 等. 陕西省苹果施肥状况评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 206-213.
Wang Xiaoying, Tong Yan'an, Liu Fen, et al. Evaluation of the situation of fertilization in apple fields in Shaanxi Province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 206-213. (in Chinese)
- 28 Wang X Y, Tong Y A, Gao P C, et al. A study to evaluate the relationships between nutrient inputs and winter wheat yield in Shaanxi, China [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2014, 23(3): 64-73.
- 29 Cui Z L, Chen X P, Li J L, et al. Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(6): 806-812.
- 30 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 552-558.
Liu Fen, Tong Yan'an, Wang Xiaoying, et al. Effects of N, P and K fertilization on wheat yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(3): 552-558. (in Chinese)
- 31 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 渭北旱塬春玉米施肥效果及肥料利用效率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 48-55.
Liu Fen, Tong Yan'an, Wang Xiaoying, et al. Effects of N, P and K fertilization on spring maize yield and fertilizer use efficiency in Weibei rainfed highland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(1): 48-55. (in Chinese)
- 32 Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- 33 Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494(28): 459-463.
- 34 Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- 35 Ju X T, Liu X J, Zhang F S, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation and policy recommendations in several

- agricultural regions of China [J]. *Ambio*, 2004, 33(6): 300 - 305.
- 36 Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8375 - 8380.
- 37 张卫峰, 马文奇, 张福锁, 等. 中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析 [J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 378 - 386.
- Zhang Weifeng, Ma Wenqi, Zhang Fusuo, et al. Comparative analysis of the superiority of China's phosphate rock and development strategies with that of the United States and Morocco [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 378 - 386. (in Chinese)
- 38 王振刚. 湖北省磷肥生产环境影响的生命周期评价 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- Wang Zhen'gang. The life cycle assessment of phosphatic fertilizer production in Hubei province [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 39 张风华, 廖文华, 刘建玲. 连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1280 - 1287.
- Zhang Fenghua, Liao Wenhua, Liu Jianling. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1280 - 1287. (in Chinese)
- 40 Cao N, Chen X P, Cui Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2012, 94(2-3): 161 - 170.
- 41 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统养分循环、平衡和调控研究 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 501 - 509.
- He Yuanqiu, Huang Xiaoqing. Nutrient cycling, balance and regulation in red soil agroecosystem [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 501 - 509. (in Chinese)
- 42 赵佐平, 同延安, 刘芬, 等. 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 1016 - 1022.
- Zhao Zuoping, Tong Yan'an, Liu Fen, et al. Effect of different long-term fertilization patterns on Fuji apple yield, quality and soil fertility on Weibei dryland, Shaanxi Province of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 1016 - 1022. (in Chinese)
- 43 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915 - 924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915 - 924. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 96 页)

- 32 吴海华, 盛建东, 陈波浪, 等. 不同水氮组合对全立交架栽培伽师瓜产量与品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 885 - 892.
- Wu Haihua, Sheng Jiandong, Chen Bolang, et al. Effect of different irrigation and nitrogen levels on the yield and quality of trellis-cultivated custard apple (*Cucumis melo* var. *saccharinus* Naud) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 885 - 892. (in Chinese)
- 33 Fabeiro C, Martin F, de Juan J A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(2): 93 - 105.
- 34 Ertek A, Sensoy S. Irrigation frequency and amount affect yield components of summer squash (*Cucurbita pepo* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(1): 63 - 76.
- 35 Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M, et al. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil [J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(1): 8 - 16.
- 36 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库-土壤剖面中累积的硝态氮 [J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 1 - 13.
- Li Shiqing, Wang Ruijun, Li Ziyun, et al. Soil nitrogen pool should not be ignored residual  $\text{NO}_3^-$ -N accumulated in soil profile in semiarid and semi humid agro-ecological system [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 1 - 13. (in Chinese)
- 37 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 61 - 64.
- Gao Yajun, Li Shengxiu, Li Shiqing, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 61 - 64. (in Chinese)
- 38 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 270 - 272.
- Zhang Shulan, Tong Yan'an, Liang Dongli, et al. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 270 - 272. (in Chinese)
- 39 陈子明, 袁锋明, 姚造华, 等. 北京潮土  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤中的移动特点及其淋失动态 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 71 - 79.
- Chen Ziming, Yuan Fengming, Yao Zaohua, et al. The movement and leaching loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in profile of Chao soil in Beijing [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1995, 1(2): 71 - 79. (in Chinese)