

DOI:CNKI:61-1390/S.20120223.1724.018

网络出版时间:2012-02-23 17:24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120223.1724.018.html>

秦岭北麓地区农田土壤养分 平衡状况演变分析

戴相林^{1,2}, 刘 瑞¹, 周建斌^{1,2}, 高雪玲³, 王天泰⁴, 崔亚胜⁵

(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;
3 长安区土肥站, 陕西 长安 710128; 4 周至县土肥站, 陕西 周至 710400; 5 户县土肥站, 陕西 户县 710300)

【摘要】【目的】研究陕西秦岭北麓地区近 30 年农田土壤养分平衡状况的演变趋势, 为评价该区域土壤肥力变化并分析其产生的环境效应提供参考。【方法】以位于陕西秦岭北麓的周至、户县和长安 3 个区县为研究对象, 采用养分平衡法分析这一地区 1980—2009 年农田土壤养分的平衡状况。【结果】自 1980 年以来, 研究地区农田化肥和有机肥的投入量均呈增加趋势, 其中化肥投入量占养分总投入量的比例由 1980 年的 47.2% 增加到 2009 年的 75.4% 增幅较大; 而有机肥投入量所占比例却由 1980 年的 34.8% 减少到 2009 年的 18.8%。农田土壤中 N 一直处于盈余状态, P_2O_5 则由亏缺转向明显盈余, K_2O 一直亏缺, 但平衡率呈减小的趋势。【结论】陕西秦岭北麓地区应采取“减氮、控磷、增钾”的措施, 以控制该区域农田土壤因 N、 P_2O_5 盈余过量而可能带来的农业面源污染问题。

【关键词】 秦岭北麓地区; 化肥; 有机肥; 农田养分平衡; 农业面源污染

【中图分类号】 S158.2

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)03-0191-09

Changes of nutrient balances in soil in the northern area of Qinling Mountain of Shaanxi during the past 30 years

DAI Xiang-lin^{1,2}, LIU Rui¹, ZHOU Jian-bin^{1,2}, GAO Xue-ling³,
WANG Tian-tai⁴, CUI Ya-sheng⁵

(1 College of Resource and Environment Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture,
Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Station of Soil and Fertilizer of Chang'an, Chang'an, Shaanxi 710128, China;

4 Station of Soil and Fertilizer of Zhouzhi, Zhouzhi, Shaanxi 710400, China;

5 Station of Soil and Fertilizer of Huxian, Huxian, Shaanxi 710300, China)

Abstract: 【Objective】Analyzing the changes of nutrient balance in soils of a region is very important to understand the change of soil fertility and their potential effect on the environment. 【Method】In this study, we analyzed the nutrient inputs and outputs in soils of the northern areas of Qinling Mountain in Shaanxi, including Zhouzhi, County Hu and Chang'an in 1980—2009, with data and parameters obtained from agriculture statistical reports and references in the region. 【Result】The results indicated that since 1980, both the nutrient input from chemical fertilizer and organic fertilizer had an increasing trend, especially the nutrients from chemical fertilizer. The proportion of chemical fertilizer to total nutrient input in the

* 【收稿日期】 2011-10-11

【基金项目】 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD15B04); 国家自然科学基金项目(40773057); 西北农林科技大学创新团队项目

【作者简介】 戴相林(1986—), 男, 河北唐山人, 在读硕士, 主要从事植物营养与环境研究。E-mail: dxlok911@163.com

【通信作者】 周建斌(1964—), 男, 陕西大荔人, 教授, 博士生导师, 主要从事植物营养与施肥、养分循环与生态环境研究。
E-mail: jbzhou@nwsuaf.edu.cn

region increased from 47.2% in 1980 to 75.4% in 2009, whereas the proportion of organic fertilizer to total nutrient input declined from 34.8% in 1980 to 18.8% in 2009. Nitrogen balance in soil of the region was at surplus; phosphorus balance became positive since 1990, instead of deficiency in 1980; and potassium balance was still negative, but the negative rate became less and less. 【Conclusion】 To prevent the non-point pollution caused by the excessive accumulation of nitrogen and phosphorus in soil in the north region of Qinling mountain of Weihe River in Shaanxi, we suggest controlling the application rates of nitrogen and phosphorus fertilizers and increasing potassium fertilizer in the agriculture.

Key words: northern area of Qinling; chemical fertilizer; organic fertilizer; nutrient balance in soil; Agricultural non-point source pollution

农田生态系统养分循环与平衡是影响土壤质量、生产力和环境质量的重要过程^[1]。农业生态系统不是单纯的自然生态系统,其受人为因素影响较大。养分循环作为生态系统最基本的功能之一,亦是如此,养分循环的每一个环节都可能带来养分损失,且农田养分平衡又依赖于养分循环来实现^[2-3]。因此,加强农田生态系统养分循环与平衡的研究,对发展可持续农业具有重要意义。

我国目前对不同空间尺度上的农田养分平衡状况研究很多^[3-10],如傅靖^[5]研究了全国及各省农田生态系统养分氮、磷、钾的平衡状况,表明全国氮、磷养分盈余量不断上升,钾素亏缺量逐年递减,且区域之间差异很大;张玉铭等^[6]研究发现,华北太行山前平原农田生态系统养分收支存在氮、磷投入过量而钾投入不足的问题;黄绍文等^[7]对河北玉田县及山东陵县 2 个定位监测点的土壤养分收支状况进行了分析与评价,认为 2 个试区氮素平衡盈余率均较高,可能会造成环境问题,陵县试区磷素未得到高效利用,钾素在 2 个试区均亏缺,且差异较大。此外,陈明昌等^[8]、张慧等^[9]、范茂攀等^[10]也分别对山西省、北京市、云南省保山市的养分平衡状况进行了研究。已有试验多以行政区划(省、县)为研究单元,而关于某一自然区域农田养分平衡状况的演变及可能带来的农业面源污染研究,还少见报道。

秦岭北麓是陕西渭河段径流的主要来源,占全区水资源量的 2/3 以上^[11]。近年来,渭河(陕西段)及其支流水质逐渐恶化,中下游河段水质基本上属于 V 类或劣 V 类^[12-16]。除生活污水等点源排放外,由农业生产引起的农业面源排放也是导致渭河水体受污染的主要原因,其中不合理施肥的影响不可忽视。长期不合理施肥不仅使该地区地表水受到污染,也使地下水受到了污染^[13,17-18]。周至、户县及长安区位于秦岭以北渭河以南,渭河的主要支流灞河、沔河、涝河及黑河贯穿该区域。这一地区也是关中

地区重要的粮食生产基地,农田施肥水平较高。自 20 世纪 80 年代以来,这一地区种植业结构不断调整,以猕猴桃、蔬菜等为代表的经济作物种植比例明显增加。因此,本试验对陕西秦岭北麓地区近 30 年农田土壤养分平衡状况的演变趋势进行了分析,旨在评价该区域土壤肥力的变化,分析其可能带来的环境效应,为保障该地区农业的可持续发展、保护渭河水质等提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区包括周至、户县及长安 3 个区县,位于关 中平原中部,南依秦岭,北临渭水。地理坐标为东经 107°39′~109°14′,北纬 33°42′~36°46′。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均日照时数 2 056.1 h,≥10℃积温 4 317.3℃,年平均气温 13.5℃,年平均降雨量 650 mm,年平均无霜期 233 d。

1.2 研究方法

本试验农田生态系统养分投入、产出及盈余量估算的基本数据,来源于研究区县的农业区划报告及统计年鉴^[19-24]。计算农田生态系统养分的投入和支出平衡状况时,把农田土壤作为一个黑箱对待^[4],并按照物质守恒定律,即养分的“输入=输出+盈余”进行养分输入、输出和盈余养分流的计算^[25],参考农田生态系统养分平衡模型及氮素平衡模型的研究和应用^[5,25],分析研究区农田土壤养分的投入和支出项目。

1.2.1 养分的投入参数与投入量计算 农田养分投入项包括化肥、有机肥、灌溉、湿沉降、种子、生物固氮和 N 素干沉降带入的养分量。

化肥养分投入量按纯养分计算,复合肥中氮磷钾比例按 $m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=1:1:1$ 计算,将折算后的养分含量合并到单质化肥中^[5]。

有机肥养分的投入量通过估算不同种类有机肥用量(包括人畜粪尿排泄量、作物秸秆还田量),再乘以相应的养分含量来估算,其中人粪尿排泄量按照成人标准计算,成人 数=人口数×0.85;畜禽头数均按年末存栏数计算。有机肥养分投入量(F_o)=粪尿肥带入养分量(F_{om})+秸秆带入养分量(F_{os})。粪尿肥带入养分量(F_{om})的计算公式为:

$$F_{om}=N_a\times e_d\times c_{nd}\times r_{pd}+N_a\times e_u\times c_{nu}\times r_{pu};$$
式中: N_a 为畜生头数或人口数,万头(万人); e_d 和 e_u 分别为粪和尿的排泄量,t/(只·年); c_{nd} 和 c_{nu} 分别为粪和尿的养分含量,t/t; r_{pd} 和 r_{pu} 分别为粪和尿的收集利用率,%。

秸秆带入养分量(F_{os})的计算公式为:

$$F_{os}=P_h\times r_{ss}\times c_{ns}\times r_{ps}\times 0.85;$$

式中: P_h 为作物产量,t; r_{ss} 为草籽比,1; c_{ns} 为秸秆养分含量,t/t; r_{ps} 为秸秆还田率,%;0.85 为去除秸秆有效水分后的折算系数。

上述计算方法和参数均参照参考文献[5]。各种有机肥的养分含量及收集利用率^[26-27]见表 1,不同农作物草籽比、秸秆养分含量及还田率^[4-6,27-29]见表 2。

表 1 各种有机肥的养分含量及收集利用率

Table 1 Nutrient content and recovery utilization of organic fertilizers

项目 Item	排泄量/ (kg·只 ⁻¹ ·年 ⁻¹) Excretion amount		粪养分含量/(g·kg ⁻¹) Nutrient content of manure			尿养分含量/(g·kg ⁻¹) Nutrient content of urine			收集利用率/% Recovery utilization	
	粪 Manure	尿 Urine	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	粪 Manure	尿 Urine
牛 Cattle	4 647.4	4 055.6	3.80	2.29	2.77	5.01	0.39	10.96	50	25
马 Horse	3 456.8	1 780.2	4.37	3.07	4.59	6.89	1.42	8.24	50	25
驴 Donkey	2 040.7	1 051.3	4.91	4.30	6.45	7.10	0.30	3.37	50	25
骡 mule	2 040.7	1 051.3	3.12	3.57	2.80	6.00	0.30	3.37	50	25
猪 Pig	1 275.3	2 143.7	5.50	5.49	3.49	1.70	0.50	0.27	65	30
羊 Sheep	458.8	173.2	11.04	4.94	6.41	5.92	0.48	8.37	45	10
家禽 Poultry	33	—	9.67	8.90	8.29	—	—	—	45	—
人 Human	113.7	579.3	11.30	5.95	3.61	5.01	0.39	10.96	60	30

表 2 不同农作物的草籽比、秸秆养分含量及还田率

Table 2 Ratio of straw to grain, straw nutrient content and returning rate

农作物 Crop	草籽比 Ratios of grain to straw	秸秆养分含量/(g·kg ⁻¹) Nutrient content in straw			秸秆还田率/% Straw returning rate
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
小麦 Wheat	1.718	6.5	1.8	12.7	45
玉米 Maize	1.269	9.2	3.5	14.2	20
大豆 Soybean	1.295	18.1	4.5	14.1	45
油菜 Rape	2.985	9.0	5.0	17.6	40

1.2.2 养分的支出参数与支出量计算 农田养分支出项主要包括作物收获带走的养分、肥料 N 损失和农田养分损失。其中农田养分损失包括渗漏损失和径流损失,由于缺乏相应数据未予以考虑。

作物收获带走的养分量根据作物秸秆和籽粒的

灌溉带入养分量通过水浇地面积乘以灌溉带入养分速率^[30]计算,其中 N、P₂O₅ 和 K₂O 灌溉带入养分速率分别为 20.7、1.14 和 8.31 kg/(hm²·年)。种子带入养分量通过农作物的种植面积、单位面积播种量和种子养分含量^[5,31]计算,本研究只考虑了研究地区主要农作物小麦、玉米的种子养分带摄入量。湿沉降带入养分量通过耕地面积乘以湿沉降带入养分速率^[30,32]计算,N 素干沉降带入养分量通过耕地面积乘以 N 素干沉降带入养分速率^[33]计算,其中 N、P₂O₅ 和 K₂O 湿沉降带入养分速率分别为 16.3、0.60 和 7.95 kg/(hm²·年),N 素干沉降带入养分速率为 1.50 kg/(hm²·年)。生物固氮带入养分量分为共生固氮与非共生固氮带入养分量 2 部分,其中非共生固氮带入养分量通过耕地面积乘以非共生固氮速率^[34]计算,共生固氮带入养分量通过作物的种植面积乘以共生固氮速率^[27]计算得出;共生固氮作物中,本研究只考虑大豆的共生固氮量,其中大豆的共生固氮速率为 69.6 kg/(hm²·年),旱地和水田的非共生固氮速率分别为 15.0 kg/(hm²·年)和 45.0 kg/(hm²·年)。

产量及每收获单位经济产量带走的养分量计算: $H_C=P_h\times p+P_h\times r_{ss}\times c_{ns}\times (1-r_{ps})\times 0.85$,其中 H_C 为作物收获带走的养分量,t; P_h 为作物产量,t; p 为每收获单位经济产量带走的养分量,t/t; r_{ss} 为草籽比,1; c_{ns} 为秸秆养分含量,t/t; r_{ps} 为秸秆还田

率,%;0.85为去除秸秆有效水分后的折算系数。本研究只考虑调查地区主要作物小麦、玉米、大豆、油菜、瓜类、蔬菜和水果收获后带走的养分含量,计算参数见表 3。

肥料 N 损失分为化肥 N 损失和有机肥 N 损失,可分别根据化肥施入量及有机肥施入量乘以相应的 N 素损失率计算,其中化肥和有机肥的 N 素损失率分别为 40%和 30%^[2-3]。

表 3 不同农作物形成 100 kg 经济产量所带走的养分量

Table 3 Nutrient content in 100 kg economic yield of crops

kg

农作物 Crop	收获物 Harvest part	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦 Wheat	籽粒 Grain	3.00	1.25	2.50
玉米 Maize	籽粒 Grain	2.57	0.86	2.14
大豆 Soybean	豆粒 Grain	7.20	1.80	4.00
油菜 Rape	菜籽 Rapeseed	5.80	2.50	4.22
蔬菜 Vegetable	—	0.32	0.17	0.41
瓜类 Melon	果实 Fruit	0.40	0.35	0.60
果树 Fruit	果实 Fruit	0.50	0.20	0.60

注:豆科作物主要借助根瘤菌固氮,从土壤中吸收的氮素仅占 1/3 左右^[4];蔬菜、瓜类和果树的数据为平均值,其中果实为鲜质量,其余均为风干质量^[35-36]。

Note:The legume crops fix the nitrogen from air by legumous bacteria,and it only takes up one third of nitrogen from the soil;the nutrient contents in vegetable,melons and fruit trees were the average values,and the value of fruit is the fresh weight basis and the values of the others are dry weight basis.

2 结果与分析

2.1 农田生态系统养分投入状况的演变

从表 4 可以看出,与 1980 年相比,2009 年研究区域养分总投入量平均增加了 2.5 倍。不同来源养分中,化肥投入量占总养分投入量的比例最大,且随着年份推进呈明显的增加趋势,1980,1990,2000 及 2009 年化肥投入量占总养分投入量的比例分别为

47.2%,62.5%,64.9%和 75.4%;其次是有机肥(秸秆和粪尿肥),投入比例逐年降低,1980,1990,2000 和 2009 年其占总养分量的投入比例分别为 34.8%,25.7%,26.9%和 18.8%;其他项目(种子、灌溉、湿沉降、生物固氮、N 素干沉降)养分投入量占总养分投入量的比例较小,1980,1990,2000,2009 年分别为 18.0%,11.8%,8.2%和 5.8%。

表 4 1980—2009 年周至县、户县和长安区农田生态系统的养分收支状况

Table 4 Nutrients balances in soils of Zhouzhi,Huxian and Chang'an county in 1980—2009

t

年份 Year	项目 Item	投入 Input					支出 Output		
		化肥 Fertilizer	粪尿肥 Manure	秸秆还田 Returned straw	其他 Other	合计 Sum	作物收获 Crop harvest	肥料 N 损失 Nitrogen loss	合计 Sum
1980	N	20 061	5 811	1 933	6 802	34 607	22 133	9 768	31 901
	P ₂ O ₅	5 163	3 356	597	564	9 680	9 697	—	9 697
	K ₂ O	—	3 261	3 645	2 238	9 144	22 869	—	22 869
1990	N	33 154	6 357	2 452	7 110	49 073	27 095	15 169	42 264
	P ₂ O ₅	9 595	3 541	763	588	14 487	10 376	—	10 376
	K ₂ O	9 243	3 722	4 549	2 056	19 570	27 842	—	27 842
2000	N	41 806	9 107	2 771	6 275	59 959	33 911	19 454	53 365
	P ₂ O ₅	12 977	5 701	891	550	20 119	12 962	—	12 962
	K ₂ O	14 937	5 415	5 012	2 015	27 379	34 938	—	34 938
2009	N	59 738	6 942	3 288	5 614	75 582	41 409	25 978	67 387
	P ₂ O ₅	19 177	3 958	1 042	496	24 673	15 990	—	15 990
	K ₂ O	21 328	3 784	5 951	1 709	32 772	42 648	—	42 648

就 N、P₂O₅、K₂O 不同养分投入量的演变看,1980—2009 年,随着时间的推移,N、P₂O₅、K₂O 的投入量均呈现出直线递增的趋势。1980,1990,2000 及 2009 年,N 素投入总量分别为 34 607,49 073,59 959和 75 582t,1990 较 1980 年、2000 较 1990

年、2009 较 2000 年分别增加 41.8%,22.2%和 26.1%;P₂O₅ 投入总量分别为 9 680,14 487,20 119 和 24 673 t,1990 较 1980 年、2000 较 1990 年、2009 较 2000 年分别增加 49.7%,38.9%和 22.6%;K₂O 投入总量分别为 9 144,19 570,27 379 和 32 772 t,

1990 较 1980 年、2000 较 1990 年、2009 较 2000 年分别增加 114.0%,39.9%和 19.7%。可见,尽管 N、P₂O₅、K₂O 养分投入量随着时间的推移在不断增加,但其增长率却呈降低趋势。

2.2 农田生态系统养分支出状况的演变

表 4 显示,农田养分支出以作物收获带走的养分量为主,1980,1990,2000 及 2009 年作物收获带走的养分量占养分总支出量的比例较大,分别为 84.8%,81.2%,80.8%和 79.4%;肥料 N 损失的养分支出量占养分总支出量的比例较小,分别为 15.2%,18.8%,19.2%和 20.6%。随着时间的推移,养分总支出量逐年增加,2009 年养分总支出量为 126 025 t,分别比 1980,1990,2000 年增加 95.5%,56.6%和 24.5%。

与养分投入量类似,1980—2009 年,N、P₂O₅、K₂O 总支出量也呈现直线递增趋势。1980,1990,2000 及 2009 年,N 素总支出量分别为 31 901,42 264,53 365 和 67 387 t,1990 较 1980 年、2000 较 1990 年、2009 较 2000 年分别增加 32.5%,26.3%和 26.3%;P₂O₅ 总支出量分别为 9 697,10 376,12 962 和 15 990 t,1990 较 1980 年、2000 较 1990 年、2009 较 2000 年分别增加 7.0%,24.9%和 23.4%;K₂O 总支出量分别为 22 869,27 842,34 938 和 42 648 t,1990 较 1980 年、2000 较 1990 年、2009 较 2000 年分别增加 21.7%,

25.5%和 22.1%。

从不同养分比较来看,N 素养分支出量最大,1980,1990,2000,2009 年养分支出量占养分总支出量的比例分别为 49.5%,52.5%,52.7%和 53.5%;其次为 K₂O,1980,1990,2000,2009 年所占比例分别为 35.5%,34.6%,34.5%和 33.8%;P₂O₅ 最小,1980,1990,2000,2009 年所占比例分别为 15.0%,12.9%,12.8%和 12.7%。

2.3 农田生态系统养分的平衡特征

由表 5 可以看出,1980—2009 年,周至县农田养分平衡中 N 素始终处于盈余状态,但有逐年减少的趋势,其平衡率由 1980 年的 31.6%降低到 2009 年的 10.6%;P₂O₅ 的平衡率始终处于较高状态,其 4 年平均平衡率为 82.7%;K₂O 除 2009 年盈余外,其他年份均亏缺。1980—2009 年,户县 N 素均处于盈余状态,2009 年平衡率达到最高,为 13.2%;P₂O₅ 的平衡率为-10.1%~25.8%;K₂O 在这 4 年中均亏缺,平衡率平均值为-56.9%。1980—2009 年,长安区除 1980 年 N 素亏缺外,其余年份 N 素均盈余;P₂O₅ 从 1990 年开始出现盈余,其最高平衡率出现在 2000 年,达到 60.3%;K₂O 在 4 年中基本处于亏缺状态,但其平衡率呈现出先升高后降低的趋势,这与长安区种植业结构、面积的调整有关。

表 5 1980—2009 年周至、户县和长安区农田生态系统的土壤养分平衡

Table 5 Nutrients balance of Zhouzhi, Huxian and Chang'an county in 1980—2009													
年份 Year	项目 Item	周至县 Zhouzhi			户县 Huxian			长安区 Chang'an			合计 Sum		
		投入/t Input	支出/t Output	平衡率/% Rate of balance	投入/t Input	支出/t Output	平衡率/% Rate of balance	投入/t Input	支出/t Output	平衡率/% Rate of balance	投入/t Input	支出/t Output	平衡率/% Rate of balance
1980	N	11 692	8 886	31.6	10 295	9 285	10.9	12 620	13 730	-8.1	34 607	31 901	8.5
	P ₂ O ₅	3 250	3 041	6.9	2 850	2 680	6.3	3 580	3 976	-10.0	9 680	9 697	-0.2
	K ₂ O	2 583	5 729	-54.9	2 570	6 507	-60.5	3 991	10 633	-62.5	9 144	22 869	-60.0
1990	N	15 109	12 682	19.1	12 642	11 816	7.0	21 322	17 766	20.0	49 073	42 264	16.1
	P ₂ O ₅	6 232	3 068	103.1	2 752	3 061	-10.1	5 503	4 247	29.6	14 487	10 376	39.6
	K ₂ O	5 482	8 278	-33.8	2 554	8 120	-68.5	11 534	11 444	0.8	19 570	27 842	-29.7
2000	N	16 666	14 896	11.9	16 868	16 538	2.0	26 425	21 931	20.5	59 959	53 365	12.4
	P ₂ O ₅	6 798	3 589	89.4	5 089	4 239	20.1	8 232	5 134	60.3	20 119	12 962	55.2
	K ₂ O	9 333	9 722	-4.0	4 758	11 462	-58.5	13 288	13 754	-3.4	27 379	34 938	-21.6
2009	N	20 013	18 090	10.6	25 195	22 254	13.2	30 374	27 043	12.3	75 582	67 387	12.2
	P ₂ O ₅	10 005	4 328	131.2	6 503	5 169	25.8	8 165	6 493	25.8	24 673	15 990	54.3
	K ₂ O	14 706	11 698	25.7	8 299	13 847	-40.1	9 767	17 103	-42.9	32 772	42 648	-23.2

从整个研究区域来看,1980—2009 年,N 素均盈余;P₂O₅ 除 1980 年亏缺外,其余年份均盈余,且平衡率较高;K₂O 一直亏缺,但其平衡率呈现出逐年减小的趋势。1980—1990 年,N、P₂O₅ 和 K₂O 的平衡率均呈现出快速增加的趋势,1990 年平衡率分别比 1980 年增加 89.4%、198.0 倍和 50.5%;

1990—2000 年 N 素平衡率下降,2000 年较 1990 年下降了 23.0%,而 P₂O₅、K₂O 的平衡率虽在增加,但增加速率减缓,2000 年与 1990 年相比分别增加了 39.4% 和 27.3%;2000—2009 年,N、P₂O₅ 和 K₂O 的平衡率基本保持不变,分别维持在 12.3%,54.8%和-22.4%左右。

2.4 农田生态系统养分平衡状况的评价

2.4.1 养分允许平衡率 鲁如坤等^[37]提出了用养分允许平衡率对农田养分平衡状况进行评价的方法和原则。养分允许平衡率是指在当地条件下,养分亏缺或盈余在一定范围内是允许的,养分亏缺时并不影响作物产量,盈余时也不会造成肥料浪费。通过养分允许平衡率,可以评价某一地区养分亏缺是否处于合理状态。根据周至县、户县和长安区 2007—2010 年进行的“3414”测土配方施肥的试验结果^[38-40],了解土壤养分的自然供给力,并用养分增

产率的相对值表示,结果见表 6。利用表 6 的结果可以计算出某一地区某一养分的允许平衡率(B)。

$$B=[(1-SCI)/E-1]\times 100\%,$$
$$SCI=1/D\times 100\%。$$

式中: B 为某养分允许平衡率; SCI 为土壤养分自然供给率; E 为某养分肥料利用率,本研究中 N 、 P_2O_5 、 K_2O 的 E 分别为 31%,15%,41%; D 为养分增产率,计算时用其相对值表示,如某养分增产率为 30%时,则养分增产率相对值为 1.3。

表 6 周至县、户县及长安区的养分增产率相对值

Table 6 Rate of increased production(relative value) of Zhouzhi, Huxian and Chang'an county

作物 Crop	周至 Zhouzhi			户县 Huxian			长安 Chang'an		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦 Wheat	1.39	1.11	1.11	1.17	1.09	1.08	1.22	1.06	1.07
玉米 Maize	1.38	1.08	1.12	1.10	1.06	1.02	1.11	1.03	1.02
平均 Average	1.38	1.10	1.11	1.13	1.08	1.05	1.16	1.06	1.07

2.4.2 养分平衡状况评价 鲁如坤等^[37]对农田养分平衡的评价原则为,在养分增产率较低时(<10%),尽管允许平衡率可以有赤字,但为了保护土壤肥力,该养分应该保持基本平衡。氮肥增产率在 10%~50%时, N 可以有盈余,但最大盈余量不得造成环境问题。磷肥增产率<10%时,投入与支出应达基本平衡或有少量赤字;增产率在 10%~25%时,投入应有适量盈余(+20%以下);增产率>25%时, P_2O_5 实际平衡率可以略高于 20%。当某种养分的允许平衡率在 100%时,任何平衡盈余都没必要。

由表 7 可以看出,3 个县区 N 的实际平衡率均高于其允许平衡率。由于 N 肥在这 3 个县区的增产率均>10%,表明 N 可以允许少量盈余,可见这 3 个县区 N 肥的施用量基本合理,但仍需注意 N 肥过

量带来的环境污染问题。3 个县区 P_2O_5 实际平衡率差异较大,其中周至县磷肥增产率为 10%,但 P_2O_5 实际平衡率却高达 131.2%,比允许平衡率高出近 200 个百分点,已经远远超出 20%的适量平衡率,表明周至县磷肥施用量较高,磷肥浪费现象严重。户县、长安区 P_2O_5 实际平衡率也明显高于允许平衡率,说明这 2 个县区也存在与周至县类似的情况,即存在过量施用磷肥问题。3 个县区 K_2O 实际平衡率差异也比较大,除周至县 K_2O 盈余外,其他 2 个地区的 K_2O 均处于亏缺状态。尽管周至县钾肥增产率>10%,但其实际平衡率高出允许平衡率达 100 个百分点,因此,该地区应适当减少钾肥施用量。户县、长安区 K_2O 实际平衡率已分别达到 -40.1%和 -42.9%,为保持养分平衡,应适当增加钾肥的投入量。

表 7 2009 年周至县、户县及长安区农田养分允许平衡率

Table 7 Nutrient balance rates in farmland of Zhouzhi, Huxian and Chang'an county in 2009 %

县区 County	实际平衡率 Actual balance rate			允许平衡率 Allowable balance rate		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
周至 Zhouzhi	10.6	131.2	25.7	-10.6	-41.8	-75.3
户县 Huxian	13.2	25.8	-40.1	-61.7	-52.7	-88.6
长安 Chang'an	12.3	25.8	-42.9	-54.7	-60.6	-85.0

3 讨 论

本研究结果表明,秦岭北麓 3 个区县 1980—2009 年化肥投入量占总养分投入量的比例一直在增加,由 1980 年的 47.2% 增加到 2009 年的 75.4%;有机肥投入量也呈增加的趋势,但其占总养分投入量的比例由 1980 年的 34.8% 减少到 2009

年的 18.8%。从农田养分投入结构上来讲,随着时间的推移,化肥投入量占总养分投入量的比例增加,而有机肥占总养分投入量的比例却在减少,这与前人的研究结果类似^[3-5,8]。

从 N 、 P_2O_5 、 K_2O 3 种养分的平衡状况看,研究区农田 N 素平衡状况多处在盈余状态,随着时间的推移, N 平衡率为 -8.1%~31.6%,与 P_2O_5 、 K_2O

比较相对稳定。与其他地区研究结果相比,本研究地区 N 平衡率相对较低。周杨明等^[4]研究发现,2009 年江西省农田 N 平衡率达 50%。本研究中与 N 相比,研究区农田土壤 P_2O_5 的平均盈余相对较高,随着年代的推移, P_2O_5 投入量增加幅度明显,平衡率也呈明显的增加趋势。张玉铭等^[6]对华北太行山前平原农田生态系统中 N、P、K 循环与平衡的研究也表明,磷素投入的增加使栾城县农田 P 始终有大量盈余。这与磷肥利用率低,生产中长期施用磷肥与有机肥,导致磷素过量累积有关^[41]。与 N、 P_2O_5 养分不同,本研究区农田 K_2O 多处在亏缺状态,但随着时间的推移,人们开始施用钾肥^[3],农田土壤 K_2O 平衡状况有所改善,这与傅靖^[5]的研究结果类似。

本研究的 3 个区县中,1980—2009 年周至县 P_2O_5 平衡率明显高于户县及长安区;2009 年土壤 K_2O 出现盈余,这与周至县近年来大力发展猕猴桃种植,猕猴桃施肥量高且普遍施用钾肥有关。如郁俊谊等^[42]研究表明,由于农民普遍施用钾肥,已使猕猴桃园土壤速效钾的平均含量达到了 390 mg/kg。

本研究结果表明,3 个县区 N、 P_2O_5 、 K_2O 的实际平衡率均高于其允许平衡率,即便考虑到养分增产率的影响,N、 P_2O_5 的平衡率仍然较高,尤其是 P_2O_5 的实际平衡率远高于其允许平衡率。N、 P_2O_5 养分在土壤中的长期盈余,无疑会增加这一地区农业面源污染的风险。Sims 等^[43]研究表明,多数作物种植区域内的水体出现了严重的富营养化,地表径流中的总氮、硝态氮及亚硝态氮含量与作物种植面积百分比呈显著正相关。Heckrath 等^[44]研究发现,耕层土壤 Olsen-P 含量达到 60 mg/kg 时,淋失的土壤磷素较高,会影响水环境质量。Cooke^[45]研究表明,当化肥施用量过多时,养分损失量会显著增加,不施或少施化肥,养分损失量差别不大,但作物产量却明显下降,这主要是由于土壤保肥能力差,养分大量积累所致。秦岭北麓地区土层厚度相对较浅,土质较粗,淋溶作用强。刘瑞等^[46]对该地区的研究结果表明,随着氮肥用量的增加,冬小麦收获后 0~2 m 土层土壤积累的硝态氮含量呈指数趋势增加,硝态氮累积量为 52.4~809.7 kg/hm²,平均为 280 kg/hm²;其中硝态氮累积量大于 300 kg/hm² 的试验处理达 47.6%,大于 500 kg/hm² 的试验处理达 11.9%。因此,有必要采取有效措施,避免氮、磷肥的盲目过量施用,以保护这一区域的生态环境。

4 结 论

1)自 1980 年以来,研究地区农田的化肥投入量明显增加,其占总养分投入量的比例也在持续增加,由 1980 年的 47.2%增加到 2009 年的 75.4%;有机肥投入量虽也呈增加趋势,但其占总养分投入量的比例已由 1980 年的 34.8%减少到 2009 年的 18.8%。

2)研究区农田土壤 N 一直处于盈余状态; P_2O_5 从 20 世纪 80 年代初的亏欠向明显盈余状况发展,平衡率已高于 N; K_2O 一直处在亏缺状态,但随着年代的推移,农田土壤 K_2O 平衡率呈现出减小的趋势。

3)秦岭北麓是陕西渭河段径流的主要来源,这一地区土层厚度相对较浅,土质较粗,淋溶作用强。因此,对该地区应采取“减氮、控磷、增钾”的措施,避免农田土壤因 N、 P_2O_5 盈余过量而可能带来的农业面源污染问题。

[参考文献]

- [1] 杨林章,孙波.中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理[M].北京:科学出版社,2008.
Yang L Z, Sun B. Agro-ecosystem nutrient cycling and balance and its management in China [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 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 I:农田养分支出参数[J].土壤通报,1996,27(4):145-151.
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research of agro-ecosystem nutrient cycling and balance in typical areas in China I: Expenditure nutrient parameters [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 145-151. (in Chinese)
- [3] 杨学云,黎青慧,孙本华,等.陕西省典型农区农田生态系统养分平衡研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(2):99-103.
Yang X Y, Li Q H, Sun B H, et al. Study on nutrients balance of farming ecosystem in typical areas of Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2001, 29(2): 99-103. (in Chinese)
- [4] 周杨明,于秀波,鄯邦有.1949—2005 年江西省农田养分平衡动态的宏观分析[J].江西农业大学学报,2008,30(5):919-926.
Zhong Y M, Yu X B, Yan B Y. Balance and change trend of cropland soil nutrients in Jiangxi province during 1949 to 2005 [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2008, 30(5): 919-926. (in Chinese)
- [5] 傅靖.我国农田生态系统养分氮磷钾平衡研究[D].北京:中国农业大学,2007.
Fu J. Nutrient budgets on agro-ecosystem in China [D]. Beijing: China University of Agriculture, 2007.

- jing:China Agricultural University,2007. (in Chinese)
- [6] 张玉铭,胡春胜,毛钊钊,等. 华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究 [J]. 应用生态学报,2003,14(11):1863-1867.
- Zhang Y M,Hu C S,Mao R Z,et al. Nitrogen,phosphorus and potassium cycling and balance in farmland ecosystem at the piedmont of Taihang [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(11):1863-1867. (in Chinese)
- [7] 黄绍文,金继云,左余宝,等. 农田土壤养分平衡状况及其评价的试点研究 [J]. 土壤肥料,2000(6):14-19.
- Huang S W,Jin J Y,Zuo Y B,et al. Nutrient balance of agricultural soils and their evaluation [J]. Soils and Fertilizers,2000(6):14-19. (in Chinese)
- [8] 陈明昌,张 强,程 斌,等. 山西省主要农田施肥状况及典型县域农田养分平衡研究 [J]. 水土保持学报,2005,19(4):1-5.
- Chen M C,Zhang Q,Cheng B,et al. Fertilizer application survey and farmland nutrient balance of representative counties in Shanxi Province [J]. Journal of Soil Water Conservation,2005,19(4):1-5. (in Chinese)
- [9] 张 慧,高如泰,夏训锋,等. 北京地区农田生态系统磷养分平衡研究:以密云县和房山区为例 [J]. 环境科学与技术,2010,33(10):195-199.
- Zhang H,Gao R T,Xia X F,et al. Analysis of phosphorus balance of farmland in Beijing:A case study of Miyun county and Fangshan district [J]. Environmental Science & Technology,2010,33(10):195-199. (in Chinese)
- [10] 范茂攀,郑 毅,李少明,等. 保山市农田生态系统养分循环与平衡研究 [J]. 云南农业大学学报,2005,20(3):415-418.
- Fan M P,Zheng Y,Li S M,et al. Nutrient cycling and balance of agro-ecosystem in Baoshan,Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University,2005,20(3):415-418. (in Chinese)
- [11] 王文科,王 钊,孔金玲,等. 关中地区水资源分布特点与合理开发利用模式 [J]. 自然资源学报,2001,16(6):499-504.
- Wang W K,Wang Z,Kong J L,et al. The distribution characteristics and patterns of rational exploitation/utilization of water resources in Guanzhong region [J]. Journal of Natural Resources,2001,16(6):499-504. (in Chinese)
- [12] 范拴喜. 渭河流域陕西段农业面源污染与防治对策 [J]. 农业环境与发展,2010(1):68-73.
- Fan S X. Countermeasures on agricultural non-point pollution for Wei river of Shaanxi [J]. Agro-Environment & Development,2010(1):68-73. (in Chinese)
- [13] 刘冬梅,王育材,管宏杰. 陕西水资源污染农业非点源污染贡献分析 [J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2008,8(5):92-96.
- Liu D M,Wang Y C,Guan H J. Analysis of agricultural non-point source to the pollution of water resources in Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition,2008,8(5):92-96. (in Chinese)
- [14] 陈 勇,冯永忠,杨改河. 陕西省农业非点源污染现状与区域特征研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,38(11):75-83.
- Chen Y,Feng Y Z,Yang G H. Study on current situation and regional characteristic of agriculture non-point source pollution in Shaanxi province [J]. Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition,2008,38(11):75-83. (in Chinese)
- [15] 刘利花. 渭河水体富营养化与土壤磷素淋溶的研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2005.
- Liu L H. Study on eutrophication of Wei river and loss of phosphorus from soil to water [D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2005. (in Chinese)
- [16] 宋 蕾,王永胜,张鸿涛. 关中抽渭灌区农田面源污染对渭河水体的影响 [J]. 环境保护,2008(8):24-28.
- Song L,Wang Y S,Zhang H T. Effects on Weihe water body by agricultural non-point source pollution [J]. Environmental Protection,2008(8):24-28. (in Chinese)
- [17] 姜桂华. 关中盆地水污染现状与防治对策 [J]. 地下水,2002,24(2):94-95.
- Jiang G H. Countermeasures on water pollution for Guanzhong basin [J]. Groundwater,2002,24(2):94-95. (in Chinese)
- [18] 姜桂华,王文科,乔小英. 关中盆地地下水特殊脆弱性及其评价 [J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(6):1106-1110.
- Jiang G H,Wang W K,Qiao X Y. Groundwater special vulnerability and its assessment in Guanzhong basin [J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2009,39(6):1106-1110. (in Chinese)
- [19] 周至县农业区划委员会. 陕西省周至县农业资源调查和农业区划报告集 [R]. 陕西周至:周至县农业区划委员会,1986.
- Zhouzhi Agricultural Zoning Committee. Resources investigation and report on division of comprehensive agriculture in Zhouzhi county,Shaanxi [R]. Zhouzhi,Shaanxi:Zhouzhi Agricultural Zoning Committee,1986. (in Chinese)
- [20] 户县农业区划委员会. 陕西省户县农业资源调查和农业区划报告集 [R]. 陕西户县:户县农业区划委员会,1983.
- Huxian Agricultural Zoning Committee. Resources investigation and report on division of comprehensive agriculture in Huxian county,Shaanxi [R]. Huxian,Shaanxi:Huxian Agricultural Zoning Committee,1983. (in Chinese)
- [21] 长安县农业区划委员会. 陕西省长安县农业资源调查和农业区划报告集 [R]. 陕西长安:长安县农业区划委员会,1985.
- Chang'an Agricultural Zoning Committee. Resources investigation and report on division of comprehensive agriculture in Chang'an county,Shaanxi [R]. Chang'an,Shaanxi:Chang'an Agricultural Zoning Committee,1985. (in Chinese)
- [22] 周至县统计年鉴编委会. 周至县统计年鉴 [R]. 陕西周至:周至县统计局,1991,2001,2010.
- Statistics Bureau of Zhouzhi County. Zhouzhi county statistical yearbook [R]. Zhouzhi,Shaanxi:Statistics Bureau of Zhouzhi County,1991,2001,2010. (in Chinese)
- [23] 户县统计年鉴编委会. 户县统计年鉴 [R]. 陕西户县:户县统计局,1991,2001,2010.

Statistics Bureau of Huxian County. Huxian county statistical yearbook [R]. Huxian, Shaanxi; Statistics Bureau of Huxian County, 1991, 2001, 2010. (in Chinese)

[24] 长安区统计年鉴编委会. 长安区统计年鉴 [R]. 陕西长安:长安区统计局, 1991, 2001, 2010. (in Chinese)

Statistics Bureau of Chang'an County. Chang'an county statistical yearbook [R]. Chang'an, Shaanxi; Statistics Bureau of Chang'an County, 1991, 2001, 2010. (in Chinese)

[25] 王激情, 刘社平, 高 静. 河北省农田生态系统氮养分平衡状况研究 [J]. 河北北方学院学报:自然科学版, 2009, 25(1): 42-48.

Wang J Q, Liu S P, Gao J. Nitrogen budgets in agro-ecosystem of Hebei Province [J]. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2009, 25(1): 42-48. (in Chinese)

[26] 全国农业技术服务中心. 中国有机肥料养分志 [M]. 北京:中国农业出版社, 1999.

National Agricultural Technology Service Center. China organic fertilizer nutrients ambition [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)

[27] 全国农业技术服务中心. 中国有机肥料资源 [M]. 北京:中国农业出版社, 1999.

National Agricultural Technology Service Center. China organic fertilizer nourishing resources [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)

[28] Xing G X, Yan X Y. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPPC guidelines for national greenhouse gases [C]. [S. l.]: Environmental Science & Policy, 1996; 355-361.

[29] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数 [J]. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87.

Zhang F C, Zhu Z H. Harvest index for various crops in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23(2): 83-87. (in Chinese)

[30] 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 R K. Principle of soil-plant nutrition and fertilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. (in Chinese)

[31] 鲁如坤, 史陶钧. 农业化学手册 [M]. 北京:科学出版社, 1982.

Lu R K, Shi T J. Agrochemistry manual [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)

[32] 李世清, 李生秀. 陕西关中湿沉降输入农田生态系统中的氮素 [J]. 农业环境保护, 1999, 18(3): 97-101.

Li S Q, Li S X. Nitrogen added to ecosystems by wet deposition in Guanzhong Area in Shaanxi [J]. Agro-environmental Protection, 1999, 18(3): 97-101. (in Chinese)

[33] 王志辉, 张 颖, 刘学军, 等. 黄土区降水降尘输入农田土壤中的氮素评估 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3295-3301.

Wang Z H, Zhang Y, Liu X J, et al. Dry and wet nitrogen deposition in agricultural soils in the Loess area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3295-3301. (in Chinese)

[34] 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 II: 农田养分收入参数 [J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 151-154.

Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research of agro-ecosystem nutrient cycling and balance in typical areas in China II: Expenditure nutrient parameters [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 151-154. (in Chinese)

[35] 北京农业大学《肥料手册》编写组. 肥料手册 [M]. 北京:农业出版社, 1979.

Beijing Agricultural University Fertilizer Manual Compiled Group. Fertilizer manual [M]. Beijing: Agricultural Press, 1979. (in Chinese)

[36] 中国农业科学研究院郑州果树研究所. 中国西瓜甜瓜 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000.

Zhengzhou Fruit Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences. China watermelon and melon [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)

[37] 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.

Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Research of agro-ecosystem nutrient cycling and balance in typical areas in China IV: Expenditure nutrient parameters [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 197-199. (in Chinese)

[38] 西安市长安区土壤肥料工作站. 西安市长安区测土配方施肥田间试验结果汇总表 [R]. 陕西长安:西安市长安区土壤肥料工作站, 2007-2010.

Station of Soil and Fertilizer of Chang'an. The summary statement of soil testing and fertilizer recommendation in Chang'an district of Xi'an [R]. Chang'an, Shaanxi; Station of Soil and Fertilizer of Chang'an, 2007-2010. (in Chinese)

[39] 西安市户县土壤肥料工作站. 西安市户县测土配方施肥田间试验结果汇总表 [R]. 陕西户县:西安市户县土壤肥料工作站, 2007-2010.

Station of Soil and Fertilizer of Huxian. The summary statement of soil testing and fertilizer recommendation in Huxian county of Xi'an [R]. Huxian, Shaanxi; Station of Soil and Fertilizer of Huxian, 2007-2010. (in Chinese)

[40] 西安市周至县土壤肥料工作站. 西安市周至县测土配方施肥田间试验结果汇总表 [R]. 陕西周至:西安市周至县土壤肥料工作站, 2007-2010.

Station of Soil and Fertilizer of Zhouzhi. The summary statement of soil testing and fertilizer recommendation in Zhouzhi county of Xi'an [R]. Zhouzhi, Shaanxi; Station of Soil and Fertilizer of Zhouzhi, 2007-2010. (in Chinese)

[41] 杨学云, 孙本华, 古巧珍. 长期施肥磷素盈亏及其对土壤磷素状况的影响 [J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 118-123.

Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z. Phosphorus balances and its effects on soil phosphorus status under a 12-year long-term fertilization [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2007, 16(5): 118-123. (in Chinese)