

安思羽, 李艳霞, 张雪莲, 等. 我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1712–1722.

AN Si-yu, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, et al. Potential of animal manure in replacing chemical fertilizers for fruit, vegetable, and tea production in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1712–1722.

我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥潜力

安思羽¹, 李艳霞^{1*}, 张雪莲², 刘笑冰³, 陈兴财¹, 童心¹, 胡柏杨¹, 刘克锋³

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京市土肥工作站, 北京 100029; 3. 北京农学院, 北京 102206)

摘要:为探究我国畜禽有机肥对果菜茶理论养分需求量的满足水平, 评估果菜茶三大作物有机替代与化肥减量潜力, 本研究借助统计资料, 定量分析我国畜禽粪便养分资源供应量和果菜茶理论养分需求量, 在此基础上进行全国性及区域性替代可行性分析。统计分析表明: 2015年, 我国果菜茶化肥氮磷(纯养分)施用总量为 $1.84 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 是理论需求量的两倍左右, 化肥过量施用十分严重; 2015年, 我国畜禽粪便产生的氮、磷(以 P_2O_5 计, 下同)分别为 7.98×10^6 、 $6.42 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 若全部用于果菜茶, 可替代78%的化肥, 减少 $2.88 \times 10^6 \sim 5.18 \times 10^6 \text{ t}$ 氮、磷肥损失; 90%的省(市、自治区)产生的畜禽粪便可满足区域内化肥减量20%的目标, 71%的省(市、自治区)畜禽粪便可满足区域内替代50%化肥; 各地区畜禽有机肥替代化肥量空间差异较大, 除长三角、珠三角经济发达地区(上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、陕西)以外, 其余省份(市、自治区)畜禽有机肥可100%替代区域内果菜茶化肥, 并且, 东北、西北地区的畜禽粪便在满足区域内果菜茶养分需求的基础上仍有较多盈余, 可施用于粮食或者经济作物, 或者转化为优质商品有机肥补给长三角、珠三角地区。我国果菜茶三大作物通过畜禽有机肥替代化肥, 70%省份可实现化肥减量目标, 减少氮磷化肥面源污染。研究结果可为我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥施用提供一定理论指导, 为实现果菜茶化肥减量的目标提供决策支持。

关键词: 果菜茶; 畜禽粪便; 有机肥; 养分; 替代化肥潜力

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)08-1712-11 doi:10.11654/jaes.2018-1234

Potential of animal manure in replacing chemical fertilizers for fruit, vegetable, and tea production in China

AN Si-yu¹, LI Yan-xia^{1*}, ZHANG Xue-lian², LIU Xiao-bing³, CHEN Xing-cai¹, TONG Xin¹, HU Bai-yang¹, LIU Ke-feng³

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Soil and Fertilizer Extension Service Station, Beijing 100029, China; 3. Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to estimate the replacement potential of chemical fertilizers with animal manure for fruit, vegetable, and tea production in China, we calculated the nutrient level of animal manure and the theoretical nutrient demands of plants. Thereafter, we analyzed the supply and demand balance on a national and regional scale. According to statistical data from 2015, the quantity of chemical nitrogen(N) and phosphorus(in the form of P_2O_5) applied on fruits, vegetables and tea was $1.84 \times 10^7 \text{ t}$ ($\text{N} = 1.12 \times 10^7 \text{ t}$; $\text{P}_2\text{O}_5 = 7.18 \times 10^6 \text{ t}$), twice the theoretical demands. Meanwhile, animal manure contained $7.98 \times 10^6 \text{ t}$ of N and $6.42 \times 10^6 \text{ t}$ of P_2O_5 , an amount which could replace 78% of chemical fertilizers and reduce nutrient losses by $2.88 \times 10^6 \sim 5.18 \times 10^6 \text{ t}$. We calculated that 71% of the Chinese provinces could replace

收稿日期: 2018-09-28 录用日期: 2018-12-13

作者简介: 安思羽(1996—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事固体废物资源化处理及污染土壤修复研究。

E-mail: 201721180062@mail.bnu.edu.cn

*通信作者: 李艳霞 E-mail: liyxbnu@bnu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800204); 国家自然科学基金项目(21577007, 21277013)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2016YFD0800204); The National Natural Science Foundation of China (21577007, 21277013)

50% of presently used chemical fertilizers with animal manure; the percentage of provinces increases up to 90% considering a chemical fertilizer replacement of 20%. Excluding the Shanghai, Jiangsu, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Shandong, and Shaanxi provinces, all other Chinese provinces could replace 100% of the chemical fertilizers presently used for their fruit, vegetable and tea production, with animal manure. Furthermore, animal manure exceeded the demands in the northeastern and northwestern regions; hence, these areas could answer the nutrient demands of local plantations, as well as those of other regions. This study provides new scientific bases for policy decisions, encouraging a sensible reduction in the use of chemical fertilizers in China.

Keywords: fruits; vegetables; tea; livestock and poultry manures; nutrients; chemical fertilizers

我国水果、蔬菜、茶叶生产不但满足国内日益增长的需求,更是出口创汇的重要产品。数据显示,2013年世界41.8%和51.9%的蔬菜和水果均产自中国^[1],果菜茶种植产业已成为我国农业最重要的组成部分^[2]。但是调查同时发现,我国果树、蔬菜种植区土壤肥力普遍偏低,土壤退化严重,为了实现高产,农民通常采用过量施肥的方式^[3-4],从而导致菜园、果园、茶园化肥用量远远高于玉米、小麦、水稻等粮食作物,最高可达25倍^[3,5-7]。由此可以看出,我国果菜茶栽培中高施肥量的生产方式使得其在化肥减量上有着较大的潜力。与此同时,我国畜禽养殖业每年产生的畜禽粪便有超过50%得不到合理利用^[8],造成了资源的浪费和环境的污染。畜禽粪便可以作为很好的有机肥,在替代化肥方面有诸多优势,提高土壤肥力、改善土壤状况以及微生物群落,最终有效促进作物生长^[9-12]。

针对畜禽粪便的土地利用优势,农业部于2017年提出了《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》(以下简称“行动方案”),其目的主要是实现化肥减量与生产增效并重,减少果菜茶化肥施用量的同时,降低成本、减少污染,增加我国畜禽粪便有机肥的土地施用量,提高土壤肥力水平^[8]。行动方案提出了具体化肥减量化指标:提高有机肥用量,到2020年我国果菜茶优势产区化肥用量减少20%以上,核心产区和知名品牌生产基地(园区)化肥用量减少50%以上^[13]。但畜禽粪便产量、其养分含量以及区域分布是否能够满足化肥替代的需求,从而达到减量的目标,目前还未见相关研究报道。

因此,本文计算了果菜茶中无机氮、磷肥实际施用量及理论氮、磷养分需求量,同时统计了我国畜禽粪便产量及其资源量,首先从满足化肥减量目标的角度分析了畜禽粪便的替代能力,再从满足果菜茶对养分理论需求的角度,探究完全替代的条件下畜禽粪便有机肥对果菜茶养分需求的供应能力,以期为推动果菜茶化肥减量的目标提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

依据《中国统计年鉴》^[2]获得2015年我国蔬菜、水果、茶叶的产量及种植面积,通过《全国农产品成本收益汇编》^[14]获得2015年水果、蔬菜化肥实际施用量,依此计算果菜茶的实际化肥施用量及其理论养分需求量。2015年我国各省(自治区)主要畜禽年末存栏量从《中国畜牧兽医年鉴》^[15]中获取,计算畜禽粪便及其养分含量。

1.2 果菜茶实际化肥用量与理论化肥用量估算

我国蔬菜、水果氮肥、磷肥实际施用量通过下式计算:

$$H = S_i \times d_i \quad (1)$$

式中: H 为蔬菜(水果)氮(磷)肥实际施用量, 10^4 t; S_i 为蔬菜(水果)的种植面积, 10^3 hm²; d_i 为每公顷蔬菜(水果)的氮(磷)肥施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参照中国化肥网提供的茶园施肥技术^[16],茶园化肥施用量按照标准控制的氮、磷肥量计算,分别为40、13.3 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$,照下式计算:

$$H' = L \times e \quad (2)$$

式中, H' 为茶叶中氮(磷)肥实际施用量, 10^4 t; L 为茶叶产量, 10^4 t; e 为生产单位质量茶叶施用氮(磷)肥量, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

不同作物对养分的理论需求量如表1所示^[17],根据公式(3)计算我国果菜茶产品氮、磷养分理论需求量:

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i \times a_i \quad (3)$$

式中: Q 为果菜茶对于氮(磷)养分的理论需求量, 10^4 t; A_i 为*i*类作物年产量, 10^4 t; a_i 为*i*类作物形成100 kg产量所需的氮(磷)养分量, $\text{kg} \cdot 100 \text{ kg}^{-1}$ 。

1.3 畜禽粪便产生量及养分含量估算

统计研究表明,牛、猪、羊和家禽是我国畜禽粪便的重要组成部分,其年粪便产生量占全国畜禽粪便总

表1 不同作物形成100 kg产量所需氮、磷养分量^[19]Table 1 Approximate amount of N and P absorption of main crops^[19]

作物 Crops	N/kg·100 kg ⁻¹	P/kg·100 kg ⁻¹
蔬菜 Vegetables	0.40	0.35
茶叶 Tea	6.4	2.00
水果 Fruit	0.48	0.20

产量的87%~96%^[18],因此本文主要选取猪、牛、鸡、羊进行研究。综合分析了现有的四种畜禽粪便年产生量的估算方法^[19],本研究采用公式(4)、(5)进行计算:

$$P_i = B_i \times T_i \times b_i \quad (4)$$

$$N_i = P_i \times c_i \quad (5)$$

式中, P_i 为*i*种畜禽粪便产生量,10⁴ t; N_i 为*i*种畜禽粪便中氮(磷)养分含量,10⁴ t; B_i 为*i*种畜禽饲养量(对于饲养周期大于一年的畜种以存栏量计,小于一年的以出栏量计),10⁴只(头); T_i 为*i*种畜禽饲养周期(养殖超过一年的饲养周期为365 d,少于一年的为其实实际饲养周期),d; b_i 为*i*种畜禽的粪便排泄系数,kg·d⁻¹·只(头)⁻¹; c_i 为*i*种畜禽粪便中的氮(磷)排泄系数(磷换算成P₂O₅时乘系数2.29),g·kg⁻¹。

1.3.1 畜禽饲养周期及饲养量确定

依据国家环保总局给出的官方数据^[20],猪饲养周期平均为199 d,因此以出栏量计,但其中母猪主要以生产仔猪为主,一般不出栏,因此母猪以存栏量计算,饲养周期为365 d。牛、羊的饲养周期均大于一年,以年末存栏量计^[21]。因省级层面的统计数据没有对家禽进行细分统计,因此本研究中蛋鸡与肉鸡的存栏、出栏量参照朱宁等^[22]给出的算法,利用鸡蛋、鸡肉的产量进行估算,此计算结果对蛋鸡、肉鸡粪便产生量可能存在偏差。

1.3.2 畜禽养殖产污系数确定

据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业产排污系数手册》各地区猪、奶牛、肉牛、肉鸡、蛋鸡的产污系数,并参照林源等^[21]对不同时期的排泄系数做如下计算处理:

(1)生猪日产污系数=(保育期日产污系数×65 d+育肥期日产污系数×104 d)/169 d;

(2)母猪日产污系数由生猪妊娠期的产污系数和仔猪的产污系数合并所得,为:母猪日产污系数=[(妊娠期产污系数+仔猪产污系数)×20×30 d]/365 d;

(3)奶牛按照育成牛(35%)和产奶牛(65%)的比例进行折算,即奶牛日产污系数=育成牛日产污系数×35%+产奶牛日产污系数×65%;

(4)蛋鸡按育雏育成(15%)和产蛋鸡(85%)的比例进行折算,即蛋鸡日产污系数=育雏鸡日产污系数×15%+产蛋鸡日产污系数×85%;

(5)肉牛和肉鸡均为手册中所给出的系数。

役用牛和羊的产污系数未在手册中给出,依据文献报道,取其均值进行计算^[23-25]。

对于各畜种粪便中氮、磷排泄系数则选用国家环保总局发布的《畜禽养殖排污系数表》^[20]中所给出的系数,猪粪、牛粪、鸡粪中总氮、总磷含量分别为5.88、3.41 g·kg⁻¹,4.37、1.18 g·kg⁻¹和9.84、5.37 g·kg⁻¹。羊粪中氮、磷排泄系数同样取各文献报道的均值,得到氮为8.51 g·kg⁻¹,磷为1.93 g·kg⁻¹^[23-25]。

2 结果与讨论

2.1 我国果菜茶生产过程中化肥实际施用量及理论需求量

通过果菜茶中化肥实际施用量及理论养分需求量的对比,2015年果菜茶中氮、磷肥(折纯量,下同)施用量远超过作物实际需求,达2倍左右。生产过程中氮肥施用总量为1.12×10⁷ t,高于磷肥的7.18×10⁶ t,各省(市、自治区)氮肥施用范围为6.9×10³~7.87×10⁵ t,磷肥为3.9×10³~5.23×10⁵ t(表2),氮肥普遍高于磷肥施用量主要与作物自身需求有关。总体看来,我国氮、磷肥用量区域分布与果菜茶的养分需求量分布一致,中部及东南部化肥用量明显大于西北部。西北地区为我国的主要牧区,种植业的用肥需求相对较少,但是新疆地区由于水果产业发达,葡萄、甜瓜等水果类作物化肥投入大,占80%以上^[26],水果类氮、磷肥施用量分别为其实际需求量的3.8倍和6.8倍,所以理论上看新疆在水果化肥减量施用上有很大空间。东北三省土壤以黑土为主,自然肥力高,保肥能力强^[27],同时耕地的轮作或连作率低于我国中南部地区,因此其化肥的理论需求量也较低。我国中部及东南部人口密集,经济较为发达,蔬菜、水果、茶叶的需求旺盛,较明显的是山东、河南、河北、四川四省,此外在浙江、广东、福建等经济发达地区,农民在种植过程中更倾向于高投入促产量的模式^[3],从而造成化肥过量施用现象严重,蔬菜、水果氮肥施用均高于全国平均水平,特别是水果种植中化肥过量现象更为严重,氮、磷肥施用量达到理论需求量的3~9倍,但也因此表明该地区节肥潜力相对较大。

从区域分布来看,我国蔬菜产业主要以黄淮海地区全年蔬菜供应和长江流域春冬季蔬菜供应为主^[28],

山东、河南、河北、江苏、广东、四川、湖南、湖北、广西
 几省蔬菜化肥施用量大,氮、磷肥施用量均占到全国
 氮、磷肥施用量的58%左右。我国水果以苹果、柑橘
 为主,苹果以渤海湾和黄土高原为两个优势区,包括
 山东、河北、河南和陕西;以陕西省最为突出,在洛川

苹果优势产业的带动下,当地水果中氮、磷肥施用量
 分别占该省果菜茶中氮、磷肥施用量的79%和84%,
 若水果中氮肥减量20%和50%,则本省果菜茶氮肥相
 应减少16%和40%,磷肥减量20%和50%的情况下,
 总体磷肥施用可相应减少17%和42%;柑橘生产则着

表2 我国果菜茶化肥施用量及养分需求量(10^4 t)Table 2 The application of chemical fertilizer and the theoretical nutrient demand in fruit, vegetables and tea(10^4 t)

省(市、自治区) Provinces (Cities, Autonomous regions)	氮 Nitrogen						磷 Phosphate					
	蔬菜 Vegetables		水果 Fruits		茶叶 Tea		蔬菜 Vegetables		水果 Fruits		茶叶 Tea	
	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand	实际施用量 Actual dosage	理论需求量 Theoretical demand
北京 Beijing	1.36	0.82	2.30	0.52	—	—	0.72	0.72	1.73	0.22	—	—
天津 Tianjin	2.15	1.77	1.45	0.44	—	—	1.14	1.55	1.09	0.19	—	—
河北 Hebei	31.06	32.98	44.69	13.08	—	—	16.40	28.85	33.63	5.45	—	—
山西 Shanxi	6.42	5.21	14.41	4.46	2.8×10^{-5}	4.5×10^{-5}	3.39	4.56	10.84	1.86	9.3×10^{-6}	1.4×10^{-5}
内蒙古 Inner Mongolia	6.93	5.78	4.95	2.53	—	—	3.66	5.06	3.73	1.05	—	—
辽宁 Liaoning	12.50	11.73	17.27	5.58	—	—	6.60	10.27	12.99	2.33	—	—
吉林 Jilin	5.01	3.44	3.51	1.75	—	—	2.65	3.01	2.64	0.73	—	—
黑龙江 Heilongjiang	6.13	3.83	2.92	1.80	—	—	3.24	3.35	2.20	0.75	—	—
上海 Shanghai	2.86	1.46	1.04	0.43	—	—	1.51	1.27	0.78	0.18	—	—
江苏 Jiangsu	35.79	22.38	13.75	7.34	0.06	0.09	18.89	19.59	10.35	3.06	0.02	0.03
浙江 Zhejiang	15.46	7.23	16.02	4.90	0.69	1.10	8.16	6.32	12.05	2.04	0.23	0.35
安徽 Anhui	22.50	10.86	11.82	8.45	0.45	0.72	11.88	9.50	8.89	3.52	0.15	0.23
福建 Fujian	18.90	7.62	21.59	4.46	1.61	2.57	9.98	6.66	16.25	1.86	0.54	0.80
江西 Jiangxi	14.64	5.44	18.27	4.21	0.21	0.33	7.73	4.76	13.75	1.75	0.07	0.10
山东 Shandong	47.22	41.09	31.05	22.72	0.08	0.12	24.93	35.96	23.37	9.47	0.03	0.04
河南 Henan	43.80	29.83	28.90	21.19	0.26	0.42	23.12	26.10	21.75	8.83	0.09	0.13
湖北 Hubei	30.33	15.41	19.01	6.32	1.08	1.72	16.01	13.48	14.30	2.63	0.36	0.54
湖南 Hunan	34.33	15.99	25.32	6.80	0.70	1.12	18.12	13.99	19.05	2.83	0.23	0.35
广东 Guangdong	34.56	13.76	43.83	8.53	0.32	0.51	18.24	12.04	32.98	3.55	0.11	0.16
广西 Guangxi	30.53	11.14	47.98	9.94	0.25	0.41	16.12	9.75	36.11	4.14	0.08	0.13
海南 Hainan	6.60	2.29	7.30	2.47	0.006	0.006	3.48	2.00	5.49	1.03	0.002	0.002
重庆 Chongqing	18.30	7.12	11.77	2.04	0.14	0.23	9.66	6.23	8.85	0.85	0.05	0.07
四川 Sichuan	33.75	16.96	25.71	5.10	0.99	1.59	17.81	14.84	19.34	2.12	0.33	0.50
贵州 Guizhou	24.51	6.93	12.33	1.45	0.47	0.76	12.94	6.06	9.28	0.60	0.16	0.24
云南 Yunnan	25.11	7.50	18.58	3.82	1.46	2.34	13.25	6.56	13.98	1.59	0.49	0.73
西藏 Tibet	0.58	0.28	0.11	0.01	—	—	0.30	0.25	0.09	0.00	—	—
陕西 Shaanxi	13.04	7.29	49.23	10.71	0.22	0.35	6.88	6.38	37.05	4.46	0.07	0.11
甘肃 Gansu	13.18	7.29	18.83	4.30	0.01	0.01	6.96	6.38	14.17	1.79	0.002	0.003
青海 Qinghai	1.24	0.66	0.35	0.03	—	—	0.66	0.58	0.26	0.01	—	—
宁夏 Ningxia	3.23	2.30	8.28	2.42	—	—	1.71	2.02	6.23	1.01	—	—
新疆 Xinjiang	8.09	7.74	41.97	11.08	—	—	4.27	6.77	31.58	4.62	—	—
合计 Total	550.11	314.11	564.49	178.90	9.00	14.39	290.40	274.84	424.80	74.54	2.99	4.50

注:“—”表示数据未获取。

Note: “—” indicates that the data is not obtained.

重在赣南-湘南-桂北、浙-闽-粤、鄂西-湘西几大优势区,对应江西、湖南、湖北、广东、广西、福建省(区)水果氮、磷施用量均占该省(区)果菜茶化肥总用量的50%以上,按这六省(区)施用的氮磷肥减量50%计算,全国水果氮磷肥施用量可相应减少15%以上。我国茶叶产量较蔬菜和水果小很多,种植区域更加集中,主要以福建、云南、湖北、四川等省为代表^[2,17],化肥施用量相对较少。

经上述分析,我国目前果菜茶中化肥施用分布相对不平衡,中部、东南部化肥投入大,均高于国际公认的化肥施用安全上限($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[29];不同作物的实际化肥施用量与理论养分需求量的差距很大,全国水果中氮、磷肥施用平均水平分别为其理论需求量的3.5倍左右,最高可达10倍左右。因此,我国的果菜茶作物,特别是水果在种植过程中需要严格管控化肥施用量。

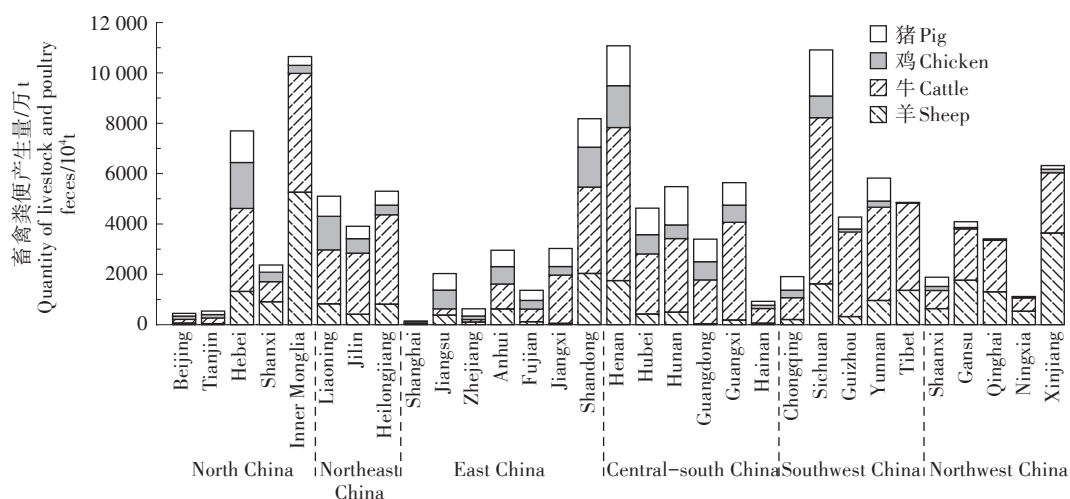
2.2 我国畜禽粪便产量及其养分资源量

依据不同畜禽的饲养量、饲养周期及产污系数等计算得到,2015年我国畜禽粪尿产量达 $2.09 \times 10^9 \text{ t}$,由于目前我国主要将固体粪便堆肥用于生产商品有机肥,因此本文对我国31个省(市、自治区)的猪、牛、鸡、羊四种主要畜禽的固体粪便(以下称“粪便”)及其中氮磷养分资源量进行研究(图1、图2),粪便总产量达 $1.30 \times 10^9 \text{ t}$,排放 $7.98 \times 10^6 \text{ t}$ 氮和 $6.42 \times 10^6 \text{ t}$ 磷(以 P_2O_5 计,下同)。

空间上,我国畜禽粪便资源分布差异显著,总体

表现为发达地区(四个直辖市及江苏、浙江、福建等省)畜禽粪便资源量远小于华北、东北、中南及西北地区众多欠发达省份,养殖区域主要集中在经济粮食、牧草等资源丰富地区^[30],以河南、山东、内蒙古、河北、四川为代表^[15]。在养殖类型上,我国形成了以四川、湖南、湖北、重庆、江西、江苏、浙江等省份为主的长江中下游地区生猪养殖带^[31],猪粪产生量 $6.61 \times 10^7 \text{ t}$,占全国的36%。肉牛、奶牛粪便高产量地区主要集中在东北和华北,分布在以河南、山东、河北为代表的中原肉牛带和东北三省肉牛带,粪便产量占全国牛粪产量的50%左右。羊粪产生量更为集中,主要分布在内蒙古和西北几大牧区,内蒙古和新疆两区羊粪贡献量可达全国总量的1/3。肉鸡养殖主要集中在我国东部地区,如山东、辽宁、江苏、广东,蛋鸡养殖则主要在长江以北,以山东、河南、河北最多,见图1。

不同畜种粪便中所排放氮磷养分不同。Turner等^[32]和Pagliari等^[33]研究认为,猪和鸡是无法产生植酸酶的非反刍动物,对谷物及饲料中添加的有机磷利用率低,因此粪便中磷排放量明显高于牛和羊等反刍动物,我国畜禽粪便普查时已发现全国猪和鸡粪磷排放总量为牛粪的2倍^[34];由于养殖种类及养殖数量的不同,各省份畜禽粪便氮、磷排放总量存在显著差异(图2)。其中畜禽粪便氮排放量最低的上海市仅有 $9.37 \times 10^3 \text{ t}$,内蒙古最高,为上海市的78倍;粪便磷排放量范围为 $8.63 \times 10^3 \sim 5.69 \times 10^5 \text{ t}$,排放量最高的河南省是最低的上海市的63倍。总体看,四川、河南、河北、山



不包括香港、澳门特别行政区和台湾省。横坐标由左至右依次为:华北地区(北京、天津、河北、山西、内蒙古),东北地区(辽宁、吉林、黑龙江),华东地区(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东),中南地区(河南、湖北、湖南、广东、广西、海南),西南地区(重庆、四川、贵州、云南、西藏),西北地区(陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆)。图2同

图1 我国主要畜种粪便产生量

Figure 1 Quantity of livestock and poultry manure in different provinces

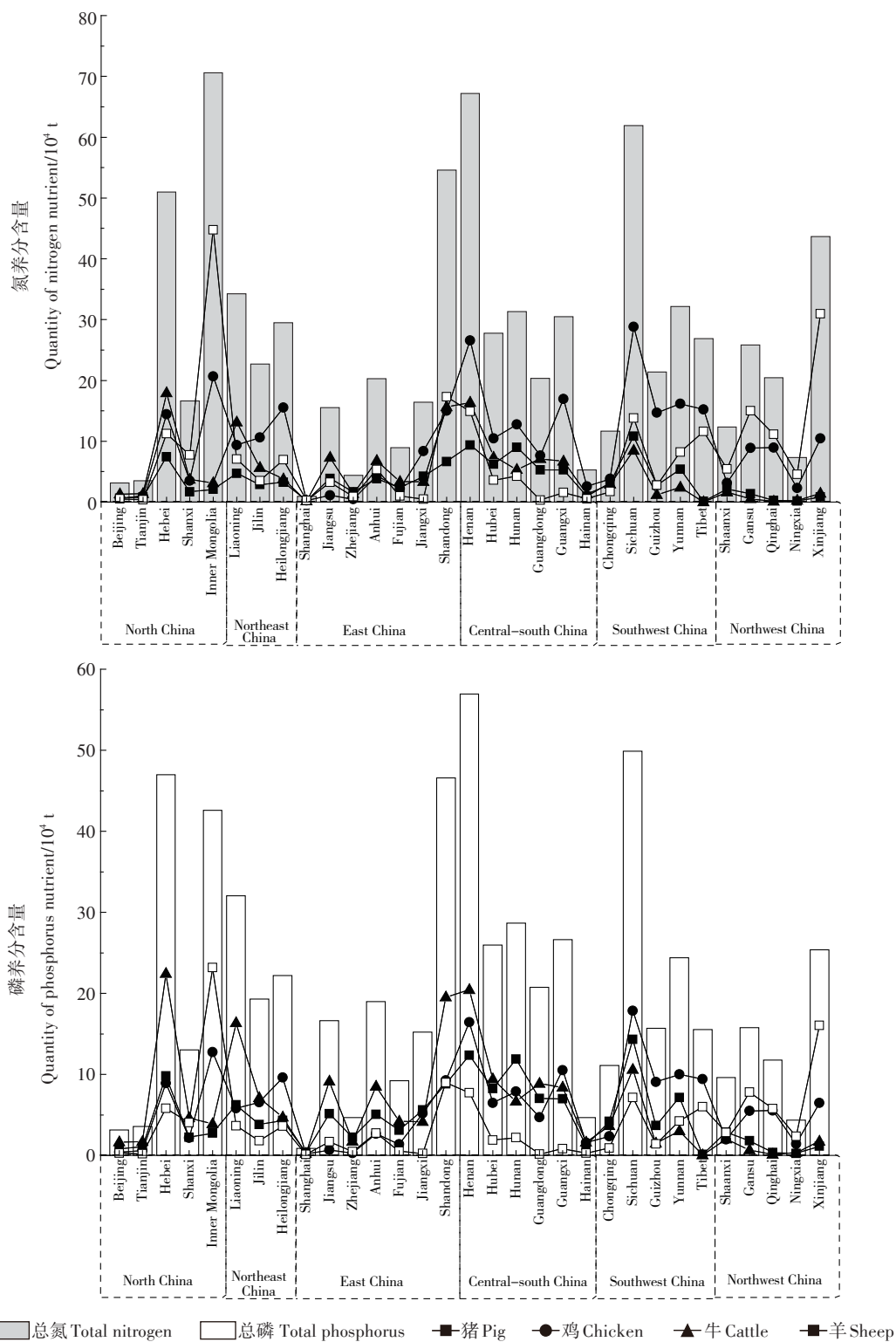


图2 畜禽粪便氮、磷养分排放量分布

Figure 2 Spatial distribution of nutrient quantity from livestock and poultry manure

东、内蒙古作为畜禽养殖大省(区),粪便氮、磷养分的排放位于全国前列,5省(区)共计排放氮 3.05×10^6 t、磷 2.43×10^6 t,均占全国的38%左右,与此前研究报道相一致^[18,21,35]。

对比表2与图2发现,畜禽粪便氮磷排放量分布基本与果菜茶中实际化肥施用量分布呈相反趋势,对于经济发达的福建、浙江、江苏等地化肥用量大而畜禽粪便氮、磷排放量少,化肥用量最高可达畜禽粪便

中氮磷排放的8倍,相反西北、东北地区的果菜茶中化肥施用量仅为其畜禽粪便氮、磷排放量的1/6~1/3。因此,对于我国各个省(市、自治区)的畜禽粪便养分含量是否能满足化肥减量的需求,本研究将进一步讨论分析。

2.3 畜禽粪便有机肥替代化肥潜力分析

研究表明,我国畜禽粪便可提供 1.44×10^7 t的氮、磷养分,达目前果菜茶中氮、磷化肥施用量的78%。据报道^[4,36],我国化肥施用后约有20%~36%的养分流失,若将所产生畜禽粪便有机肥完全替代化肥利用,可减少 $2.88\times 10^6\sim 5.18\times 10^6$ t化肥流失,减少大量氮磷进入环境,从而减轻面源污染风险。可见,畜禽粪便作为有机肥替代果菜茶中施用的化肥具有切实的环境、经济效益。

根据农业部行动方案要求,本文按各省(市、自治区)果菜茶化肥相应减量20%和50%计算,并将减量的化肥用等养分含量的畜禽粪便替代,得到所需粪便量,见图3。以内蒙古自治区为例,果菜茶产品化肥施用量的20%所需氮、磷肥量分别为 2.4×10^4 、 1.5×10^4 t,提供相应量氮、磷养分所需畜禽粪便量分别为 3.88×10^6 、 2.99×10^6 t,以需求量大的氮为计算基础,畜禽粪便替代20%的氮、磷肥后仍有 1.03×10^9 t粪便资源剩余,同理替代50%的化肥后畜禽粪便盈余 9.68×10^7 t,可见内蒙古自治区畜禽粪便替代果菜茶化肥潜力巨大。相应地,对于我国31个省(市、自治区),果菜茶化肥施用量减少20%的目标基本可以实现,仅陕西、浙江、福建三省畜禽粪便存在缺口,这与其化肥严重的过量施用有关,陕西仅苹果种植的氮、磷肥投入过量比可高达72%和50%^[37]。依据行动方案减少50%的化肥施用量的目标,华北、东北地区省份,养殖大省四川、山东、河南以及主要牧区青海、西藏、新疆等省(市、自治区)畜禽粪便资源量大,替代化肥潜力大,不存在粪便资源缺乏的问题。总体看来,由于单位面积上化肥施用量呈中部、东西部高于西北部分布,而粪便资源量分布恰恰相反,导致西部和北部各省份畜禽粪便替代化肥后盈余较大,以内蒙古自治区最多,东南部、中部的部分省(市、自治区)替代化肥的粪便量存在供应不足的可能,以陕西省缺口最大。

然而,本研究是基于目前各省市果菜茶化肥实际施用量进行计算,存在化肥过量施用的问题,若能降低化肥实际施用量,粪便需求量也会同步降低。因此,本文针对果菜茶理论养分需求量进行了各省市畜禽粪便替代化肥的估算。表3是各省市果菜茶化肥

理论养分需求完全被畜禽粪便所替代时,畜禽粪便的盈亏量。

在果菜茶理论化肥养分需求计算的基础上,24个省市畜禽粪便氮、磷养分可全部满足作物的需求,并且粪便磷的供应比氮更充足,仅余上海、浙江、江苏、福建、山东、广东、陕西畜禽粪便的氮或磷养分无法满足果菜茶的需求。分析原因认为,上海、浙江经济发展较快且更重视环保,畜禽养殖规模不断缩小,逐渐向周边省市转移,畜禽粪便的供应量也自然减少,同时浙江省作为茶叶种植大省,茶叶产量居全国第六^[2],其粪便有机肥无法满足化肥的完全替代;山东省虽养殖量大,果菜茶种植量也大,蔬菜、水果产量位居全国首位^[2],因而粪便有机肥也无法满足化肥减量的替代;福建、广东、陕西三省主要是由于存在一些优势种植区,如福建天福茗茶、福建日春茶叶、陕西洛川苹果等,造成了较大的养殖量仍无法满足化肥的减量替代现象。其余区域,如黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、四川、西藏、青海、新疆等省市,畜禽粪便产量大、养分排放量大,不仅能够满足果菜茶作物的需求,较多的盈余可以在其他大田作物栽培过程中施用,以提高土壤肥力、减少化肥的使用;对于供应量远超出自身消纳量的区域,特别是内蒙古、四川、河南等省(区),可将畜禽粪便作为有机肥源向欠缺的省份输出,实现资源的互补。

3 结论

(1)我国果菜茶生产过程中化肥用量普遍偏高,实际氮、磷肥施用量为其理论养分需求量的2倍左右,化肥高投入促产量的施肥模式不合理。

(2)2015年我国猪、牛、羊、鸡等排泄氮、磷养分分别为 7.98×10^6 t和 6.42×10^6 t,具有巨大的化肥替代潜力,若完全替代化肥利用,可减少 $2.88\times 10^6\sim 5.18\times 10^6$ t化肥养分的流失。

(3)我国28个省(市、自治区)的畜禽粪便养分供应可满足其化肥减量20%的目标,22个省(市、自治区)可达到化肥减量50%的目标;从养分对作物需求供应的角度,24个省(市、自治区)畜禽粪便氮、磷养分可实现充分供应,并且粪便磷的供应比氮更充足,以内蒙古、四川及东北三省为代表,畜禽粪便有机肥替代化肥潜力巨大。

虽然本研究按照畜禽粪便替代化肥分析了其供应潜力,但畜禽粪便有机肥是一种缓释肥料,为保证果菜茶产量配合一定量的无机化肥是必要的,因此有

表3 果菜茶化肥减量后畜禽粪便替代潜力分析(10⁴ t)Table 3 The potential of animal manure to replace chemical fertilizer(10⁴ t)

省(市、自治区) Provinces (Cities, Autonomous regions)	化肥减量20% 20% reduction in chemical fertilizer					化肥减量50% 50% reduction in chemical fertilizer				
	氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphorus fertilizer		粪便替代化肥 盈亏 ^a	氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphorus fertilizer		粪便替代化肥 盈亏
	减少量 Reduction amount	相应所需粪便量 Demand of manure for equal nitrogen fertilizer	减少量 Reduction amount in	相应所需粪便量 Demand of manure for equal nitrogen fertilizer		减少量 Reduction amount	相应所需粪便量 Demand of manure for equal nitrogen fertilizer	减少量 Reduction amount in	相应所需粪便量 Demand of manure for equal nitrogen fertilizer	
内蒙古 Inner Mongolia	2.4	387.5	1.5	299.4	10 262.6	5.9	968.8	3.7	748.5	9 681.4
四川 Sichuan	12.1	1 970.8	7.5	1 519.6	8 941.9	30.2	4 927.0	18.7	3 799.0	5 985.7
河南 Henan	14.6	2 378.7	9.0	1 822.2	8 697.8	36.5	5 946.8	22.5	4 555.4	5 129.6
西藏 Tibet	0.1	22.6	0.1	15.9	4 834.8	0.3	56.5	0.2	39.7	4 801.0
黑龙江 Heilongjiang	1.8	295.2	1.1	220.3	5 005.1	4.5	738.1	2.7	550.9	4 562.3
青海 Qinghai	0.3	51.9	0.2	37.2	3 358.3	0.8	129.6	0.5	93.0	3 280.5
吉林 Jilin	1.7	277.7	1.1	214.2	3 629.8	4.3	694.4	2.6	535.5	3 213.2
辽宁 Liaoning	6.0	970.6	3.9	794.2	4 131.3	14.9	2 426.6	9.8	1 985.6	2 675.4
新疆 Xinjiang	10.0	1 632.2	7.2	1 453.3	4 687.3	25.0	4 080.5	17.9	3 633.3	2 239.0
云南 Yunnan	9.0	1 471.9	5.5	1 123.6	4 350.9	22.6	3 679.8	13.9	2 808.9	2 143.0
山东 Shandong	15.7	2 554.6	9.7	1 958.7	5 626.5	39.2	6 386.6	24.2	4 896.8	1 794.5
河北 Hebei	15.2	2 469.8	10.0	2 027.8	5 226.9	37.9	6 174.5	25.0	5 069.6	1 522.2
甘肃 Gansu	6.4	1 044.0	4.2	856.6	3 045.0	16.0	2 609.9	10.6	2 141.4	1 479.0
贵州 Guizhou	7.5	1 216.4	4.5	906.9	3 057.8	18.7	3 041.2	11.2	2 267.1	1 233.1
山西 Shanxi	4.2	679.0	2.8	576.8	1 692.8	10.4	1 697.4	7.1	1 441.9	674.4
湖南 Hunan	12.1	1 967.6	7.5	1 516.3	3 516.6	30.2	4 919.1	18.7	3 790.7	565.1
湖北 Hubei	10.1	1 643.5	6.1	1 243.2	2 985.5	25.2	4 108.9	15.3	3 107.9	520.2
江西 Jiangxi	6.6	1 079.6	4.3	873.2	1 948.4	16.6	2 698.9	10.8	2 183.0	329.1
天津 Tianjin	0.7	117.3	0.4	90.2	424.3	1.8	293.3	1.1	225.4	248.3
宁夏 Ningxia	2.3	375.5	1.6	321.8	745.2	5.8	938.7	4.0	804.6	182.0
北京 Beijing	0.7	119.3	0.5	99.2	330.6	1.8	298.1	1.2	248.0	151.8
安徽 Anhui	7.0	1 133.6	4.2	848.0	1 821.4	17.4	2 834.0	10.5	2 120.0	120.9
上海 Shanghai	0.8	127.2	0.5	93.0	21.7	2.0	318.0	1.1	232.4	-169.1
海南 Hainan	2.8	453.2	1.8	363.8	475.6	6.9	1 133.0	4.5	909.6	-204.3
重庆 Chongqing	6.0	984.7	3.7	752.3	924.7	15.1	2 461.8	9.3	1 880.7	-552.4
广西 Guangxi	15.8	2 568.0	10.5	2 120.2	3 071.9	39.4	6 420.2	26.2	5 300.6	-780.3
江苏 Jiangsu	9.9	1 617.2	5.9	1 186.1	414.8	24.8	4 043.1	14.6	2 965.3	-2 011.1
广东 Guangdong	15.7	2 566.0	10.3	2 080.6	832.2	39.4	6 415.0	25.7	5 201.5	-3 016.9
福建 Fujian	8.4	1 372.7	5.4	1 084.8	-7.9	21.1	3 431.8	13.4	2 711.9	-2 067.0
陕西 Shaanxi	12.5	2 037.2	8.8	1 783.5	-149.0	31.2	5 093.0	22.0	4 458.8	-3 204.8
浙江 Zhejiang	6.4	1 048.7	4.1	828.6	-416.0	16.1	2 621.7	10.2	2 071.5	-1 989.0
合计 Total	224.7	36 633.9	143.6	29 111.4		561.8	91 586.3	359.1	72 778.4	

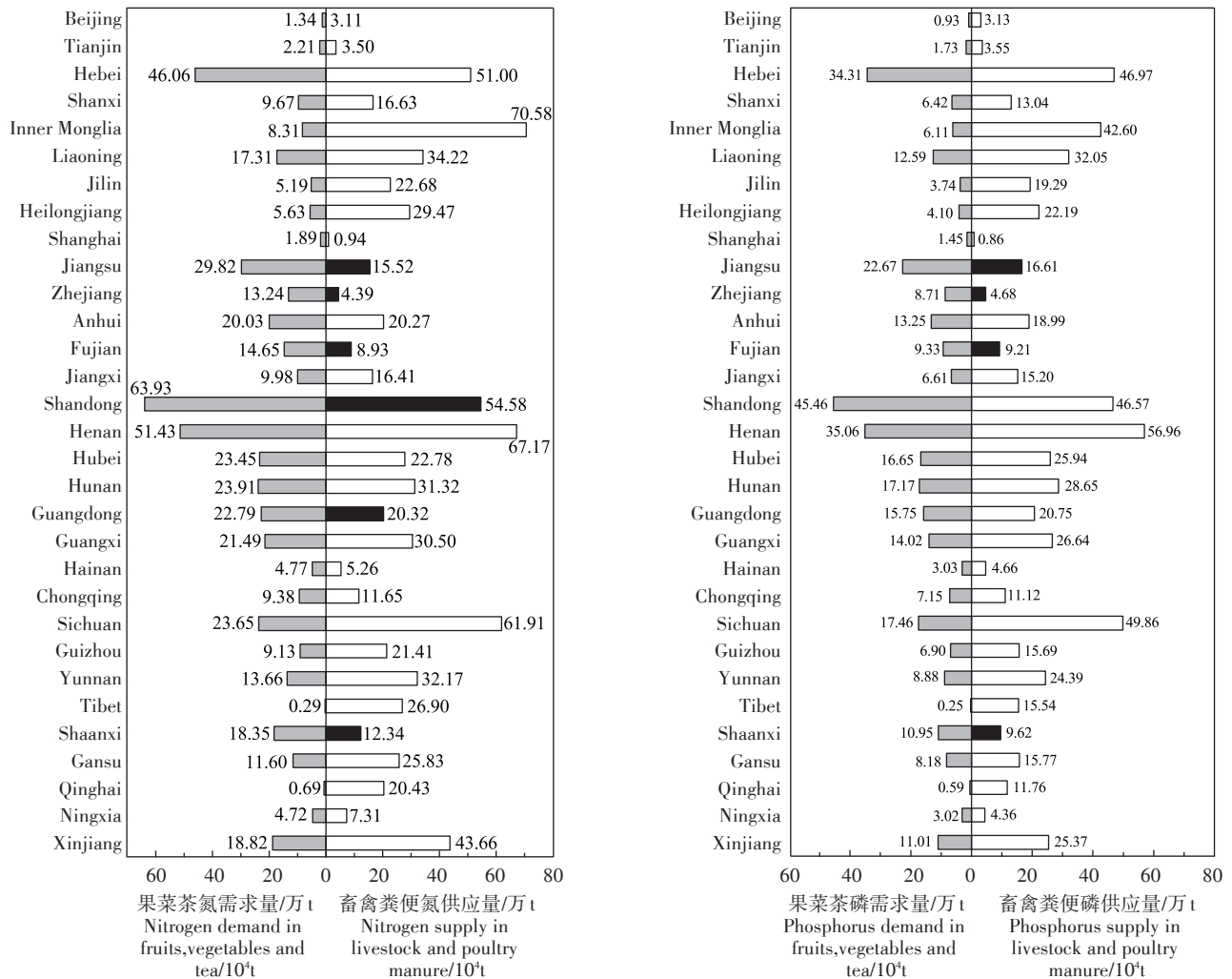
注:a.计算以用量的氮肥计,正数表示畜禽粪便替代化肥有盈余,负数表示畜禽粪便替代化肥的量不足。

Note:a indicates calculate with the value of nitrogen fertilizer. Positive numbers indicate that manure has a surplus in place of fertilizer, while negative numbers indicate deficiency.

机肥的替代化肥应遵循科学、合理的过程。另外,对于畜禽粪便中高重金属、兽药抗生素等污染物残留的问题,也需进行进一步的研究,实现畜禽粪便的无害化利用。

参考文献:

- [1] Chen X H, Ma L, Ma W Q, et al. What has caused the use of fertilizers to skyrocket in China? [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018,



白色表示畜禽粪便中养分可满足果菜茶的理论养分需求,黑色则相反

White color indicates that the nutrient in the excrement of livestock and poultry manure can meet the theoretical nutrient requirement, while black color is the opposite

图3 果菜茶养分需求量与畜禽粪便养分供应量对比图

Figure 3 The theoretical nutrient requirement and the nutrient supplement amount

110(2):241-255.

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.

National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[3] 孟远夺, 许发辉, 杨帆, 等. 我国种植业化肥施用现状与节肥潜力分析[J]. 磷肥与复肥, 2015, 30(9):1-4.

MENG Yuan-duo, XU Fa-hui, YANG Fan, et al. Situation of fertilizer application and analysis of fertilizer saving potential in crop farming in China[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2015, 30(9):1-4.

[4] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4):464-472.

[5] Huang S W, Jin J Y. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 139(1/2/3):317-327.

[6] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4):660-667.

KOU Chang-lin, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Nitrogen balance and its effects on nitrate-N concentration of groundwater in three intensive cropping systems of north China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4):660-667.

[7] 冯武焕, 吕爽, 王虎, 等. 西安市菜田化肥农药施用现状调查与分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(31):143-146.

FENG Wu-huan, LÜ Shuang, WANG Hu, et al. Investigation and analysis of application status of fertilizer and pesticide in vegetable field of Xi'an[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(31):143-146.

[8] 新华社. 农业部推动果菜茶化肥替代行动[EB/OL].[2017-06-14] http://www.xinhuanet.com/politics/2017-06/14/c_1121144399.htm. Xinhua News Agency. Ministry of agriculture promotes organic fertilizer to replace fertilizer in fruit and vegetable tea[EB/OL].[2017-06-14]

- http://www.xinhuanet.com/politics/2017-06/14/c_1121144399.htm.
- [9] Rasool R, Kukal S, Hira G. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 31-36.
- [10] 李江涛, 钟晓兰, 张 斌, 等. 长期施用畜禽粪便对土壤孔隙结构特征的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 137-140.
LI Jiang-tao, ZHONG Xiao-lan, ZHANG Bin, et al. Soil pore structure properties as affected by long-term application of poultry litter and livestock manure[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 137-140.
- [11] Zhao J, Xu J X, Wang J W, et al. Impacts of human lysozyme transgene on the microflora of pig feces and the surrounding soil[J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, 161(4): 437-444.
- [12] 陈 伟, 周 波, 束怀瑞. 生物炭和有机肥处理对平邑甜茶根系和土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3850-3856.
CHEN Wei, ZHOU Bo, SHU Huai-rui. Effects of organic fertilizer and biochar on root system and microbial functional diversity of *Malushupenhensis* Rehd[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18): 3850-3856.
- [13] 中华人民共和国农业农村部. 农业部: 确保果菜茶有机肥替代化肥取得实效[EB/OL]. [2017-03-30] http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201703/t20170330_5545107.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Ministry of Agriculture: Ensuring the effectiveness of fruit and vegetable tea organic fertilizer instead of chemical fertilizer[EB/OL]. [2017-03-30] http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201703/t20170330_5545107.htm.
- [14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 全国供销合作社, 中华人民共和国农业农村部. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
National Development and Reform Commission of China, All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National agricultural products cost-benefit data collection[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [15] 中国畜牧业年鉴编辑部. 中国畜牧业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
China Animal Industry Yearbook Editorial Department. China animal industry yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
- [16] 中国化肥网. 茶园的施肥技术[EB/OL]. [2016-06-30] <http://www.fert.cn/news/2016/6/8/201668901214652.shtml>.
China Fertilizer Network. Fertilization technology in tea gardens[EB/OL]. [2016-06-30] <http://www.fert.cn/news/2016/6/8/201668901214652.shtml>.
- [17] 邱乐丰, 龙文莉, 方 豪, 等. 基于种养平衡的杭州市畜禽养殖环境承载力研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1410-1419.
QIU Le-feng, LONG Wen-li, FANG Hao, et al. Regional environmental carrying capacity for livestock and poultry breeding based on planting-breeding balance in Hangzhou City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1410-1419.
- [18] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435-445.
ZHU Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435-445.
- [19] 刘晓永, 李书田. 中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 1-14.
LIU Xiao-yong, LI Shu-tian. Temporal and spatial distribution of nutrient resource from livestock and poultry feces and its returning to cropland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 1-14.
- [20] 中华人民共和国生态环境保护部. 关于减免家禽业排污费等有关问题的通知[EB/OL]. [2004-03-15] http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172271.htm.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the reduction of sewage charges in the poultry industry[EB/OL]. [2004-03-15] http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172271.htm.
- [21] 林 源, 马 骥, 秦 富. 中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 1-5.
LIN Yuan, MA Ji, QIN Fu. The Structure distribution and prospect of China manure resource[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(32): 1-5.
- [22] 朱 宁, 马 骥, 秦 富. 我国蛋鸡粪处理现状与对策研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
ZHU Ning, MA Ji, QIN Fu. Current status and countermeasures of poultry manure treatment in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [23] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617.
- [24] 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 规模化养殖畜禽粪便量估算及环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 733-737.
YAN Bo-jie, ZHAO Chun-jiang, PAN Yu-chun, et al. Estimation of the amount of livestock manure and its environmental influence of large-scaled culture based on spatial information[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(7): 733-737.
- [25] 张 田, 卜美东, 耿 维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241-1249.
ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1241-1249.
- [26] 赖 波, 汤明尧, 柴仲平, 等. 新疆农田化肥施用现状调查与评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1024-1030.
LAI Bo, TANG Ming-yao, CHAI Zhong-ping, et al. Investigation and evaluation of the chemical fertilizer application situation of farmland

- in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(6):1024-1030.
- [27] 王 洋, 齐晓宁, 刘兆永, 等. 黑土区长期连作玉米农田土壤肥力变化及其评价——以德惠市为例[J]. 土壤, 2008, 40(3):495-499.
- WANG Yang, QI Xiao-ning, LIU Zhao-yong, et al. Effect of long-term continuous cropping of corn on soil fertility of black soil and its evaluation: A case study of Dehui City[J]. *Soils*, 2008, 40(3):495-499.
- [28] 中华人民共和国农业农村部. 国家发改委农业部关于印发全国蔬菜产业发展规划(2011—2020年)的通知[EB/OL].[2012-03-20] http://www.moa.gov.cn/nybg/2012/dsanq/201805/t20180512_6141970.htm.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice of the national vegetable industry development plan (2011—2020)[EB/OL].[2012-03-20] http://www.moa.gov.cn/nybg/2012/dsanq/201805/t20180512_6141970.htm.
- [29] 尚 杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究[J]. 生态经济, 2016, 32(5):196-199.
- SHANG Jie, YIN Xiao-yu. Study on the present situation and reduction of fertilizer non-point source pollution of China[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(5):196-199.
- [30] 周 力. 产业集聚、环境规制与畜禽养殖半污染源污染[J]. 中国农村经济, 2011(2):60-73.
- ZHOU Li. Industrial agglomeration, environmental regulation and semi-point source pollution of livestock and poultry breeding[J]. *Chinese Rural Economy*, 2011(2):60-73.
- [31] 董 峻. 我国初步形成畜牧业生产区域化布局[J]. 草业科学, 2006(3):50.
- DONG Jun. China has initially formed a regionalized layout of animal husbandry production[J]. *Pratacultural Science*, 2006(3):50.
- [32] Turner B L, Leytem A B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: Chemical speciation and a novel fractionation procedure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(22):6101-6108.
- [33] Pagliari P H, Laboski A M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure[J]. *Journal of Environment Quality*, 2012, 41(3):901-910.
- [34] 刘更另. 中国有机肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- LIU Geng-ling. Chinese organic fertilizer[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1991.
- [35] 耿 维, 胡 林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):171-179.
- GENG Wei, HU Lin, CUI Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):171-179.
- [36] Zhang B G, Li Q, Cao J, et al. Reducing nitrogen leaching in a subtropical vegetable system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241:133-141.
- [37] 王小英, 陈占飞, 胡 凡, 等. 陕西省农田化肥投入过量与不足的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6):159-165.
- WANG Xiao-ying, CHEN Zhan-fei, HU Fan, et al. Study on the excessive and insufficient of chemical fertilizer inputs on farmland in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6):159-165.