

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌	(5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红	(5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉	(5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧	(5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东	(5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明	(5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲	(5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊	(5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波	(5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志	(5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平	(5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波	(5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标	(5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁	(5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄	(5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭	(5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天	(5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓	(5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博	(5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明	(5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰	(5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强	(5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏	(5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊	(5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐	(5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅	(5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫	(5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军	(5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学	(5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博	(5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清	(5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐	(5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军	(5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅	(5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹	(5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润	(5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳	(5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发	(5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源	(5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝	(5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强	(5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧	(5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正	(5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水	(5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠	(5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲	(5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠	(5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田	(5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录		(5740)
《环境科学》征订启事(5343)		
《环境科学》征稿简则(5439)		
信息	(5595, 5619, 5638)	

中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力

刘晓永¹, 王秀斌¹, 李书田^{1,2*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所(IPNI)北京办事处, 北京 100081)

摘要: 为准确掌握中国各省区畜禽粪尿及氮负荷量, 以及还田利用潜力, 本研究基于统计数据和已有资料, 利用猪粪当量(N)估算了1978年以来中国畜禽粪尿量的变化规律, 以及各类畜禽粪尿的构成比例, 分析和评价了2016年各省畜禽粪尿、纯氮负荷量的空间分布和污染风险, 并估算了各省畜禽粪尿的还田潜力。结果表明, 中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量总体上呈“快速增加(1978~2005年)-保持稳定(2006~2016年)”的变化态势, 到2016年, 分别达到 $366\,822.01 \times 10^4$ t和 $2\,024.10 \times 10^4$ t, 均增长了105.78%, 94.03%~98.34%的粪尿量来源于家禽、羊、猪和牛。畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量最大的区域是华北地区, 其中河南省为最, 分别占全国的22.25%和8.81%。其次是四川, 占8.14%。按耕地、作物播种面积和农用地面积分别计算单位面积上的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量, 并进行r值分级和环境风险评价。如果承载场所为耕地, 负荷量较大的是西南和东南地区, 污染风险较严重的是华北地区, 为Ⅳ级; 若按农作物种植面积, 西北和西南地区负荷量较大, 西北和华北地区为Ⅲ级有污染风险; 若按农用地计算, 华北和东南地区负荷量较大, 华北地区Ⅲ级有污染风险, 湖南负荷量最大, 北京、山东和河南为Ⅳ级较严重污染风险。全国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量分别为 $113\,480.75 \times 10^4$ t和 626.15×10^4 t, 按单位农用地面积分别相当于 $3.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 华北地区最大, 为 $8.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。若按50%的粪尿N养分环境容量($85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)计算, 全国可增加粪尿N养分还田量为 $2\,520.21 \times 10^4$ t, 粮食主产区黑龙江还田潜力最大, 其次是四川。

关键词: 畜禽粪尿; 猪粪当量(N); 负荷量; 还田潜力; 空间分布

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5723-17 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802024

Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China

LIU Xiao-yong¹, WANG Xiu-bin¹, LI Shu-tian^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China; 2. International Plant Nutrition Institute (IPNI) Beijing Office, Beijing 100081, China)

Abstract: To clearly analyze livestock and poultry faeces and the nitrogen loading rate of farmland in different provinces of China and their potential return to agricultural land, the changes of the output of various livestock and poultry faeces in China and the proportion of faeces from all types of livestock and poultry since 1978 were estimated in this paper based on statistical data and literature reviews using the pig manure equivalent (based on nitrogen) and the spatial distribution and pollution risk of livestock and the poultry faeces and nitrogen loading rates. Furthermore, the nitrogen return potential from animal faeces to farmland was analyzed and evaluated for different provinces of China in 2016. The results show that the pig manure equivalent (N) and total N from livestock and poultry faeces in China increases from 1978 to 2005 and is stable from 2005 to 2016. By 2016, the pig manure equivalent (N) and N were $366\,822.01 \times 10^4$ t and $2\,024.10 \times 10^4$ t, respectively, reflecting an increase by 105.78%. Approximately 94.03% to 98.34% of the faeces was from poultry, sheep, pigs, and cattle. The livestock and poultry faeces pig manure equivalent (N) and nutrient N were mainly distributed in North - Central China, especially in the Henan Province, accounting for 22.25% and 8.81% of the total in China, respectively, followed by the Sichuan Province. Based on the arable land, planting, and farmland areas, the pig faeces equivalent (N) and its N nutrient per unit area were calculated and the environmental risks were evaluated based on r values. Based on the arable land area, the southwestern and southeastern regions have large loading rates, while the northcentral region has a serious pollution risk of grade IV. Based on the planting area, the northwestern and southwestern regions have relatively large loading rates, while the northwestern and northcentral regions have pollution risks of grade III. Based on the farmland area, the northcentral and southeastern regions have great loading rates and the northcentral region has a pollution risk of grade III, Hunan has the largest loading rate, and Beijing, Shandong, and Henan have grade IV pollution risks. The livestock and poultry faeces pig manure equivalent (N) and amount of N nutrients returning to farmland in China are $113\,480.75 \times 10^4$ t and 626.15×10^4 t, respectively, equivalent to $3.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, and the northcentral region has the largest rates with $8.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $45.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Based on 50% of the environmental capacity of faeces N, that is, $85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the N nutrient return can increase by

收稿日期: 2018-02-03; 修订日期: 2018-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200103)

作者简介: 刘晓永(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为养分循环, E-mail: 853653593@qq.com

* 通信作者, E-mail: lishutian@caas.cn

2 520.21 $\times 10^4$ t. The Heilongjiang Province has the greatest potential return, followed by the Sichuan Province.

Key words: livestock and poultry faeces; pig manure equivalent (based on N); loading rate; potential returning to farmland; spatial distribution

改革开放以来,中国畜禽养殖业迅速发展,由分散经营转向产业化、规模化和集约化经营^[1~3],区域生产格局已基本形成^[4,5],畜禽养殖产生的粪尿及其养分也在不断增加^[6,7].同时,由于各地区的经济发展水平不同,其畜禽养殖业的发展状况也存在着很大的差异,各地区土地对畜禽粪便的消纳能力也存在不同,以及各地畜禽养殖的布局不合理、对粪尿处置的不合理以及粪尿还田利用的不当等问题,导致耕地中畜禽粪尿负荷量过高^[8~10],氮素超负荷对环境造成严重的威胁^[11,12]等.因此,及时准确地了解畜禽粪便的污染分布状况,合理规划布局畜禽养殖业的发展已成为各地亟待解决的问题.

畜禽养殖产生的粪尿污染已成为世界普遍关注的焦点^[13~17].中国畜禽粪尿资源极为丰富^[18~21],若没有足够的农田资源进行畜禽养殖废弃物的消纳,很容易对环境造成严重污染^[14,22].针对畜禽养殖引起的环境污染问题,国内相关学者已经开展了很多工作. Provolo 等^[23]、Bassanino 等^[24]和 Song 等^[25]依据耕地畜禽粪便养分负荷研究畜禽养殖对环境污染的影响.刘忠等^[26]以单位耕地面积的猪粪当量(N)负荷为指标评价了畜禽养殖废弃物的区域环境风险;刘晓利等^[27]计算了2002年中国耕地承载的畜禽氮养分平均为 $52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的省区有16个;王方浩等^[28]的研究指出,2003年中国耕地负荷的畜禽粪便猪粪当量(N)平均为 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中超过 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的省区7个;张旭美等^[29]的研究表明,中国畜禽粪便N污染负荷呈现由西北内陆向东南沿海逐渐加重的趋势,可以400 mm等降水量线为界分为高污染和低污染负荷区.畜禽粪便N污染负荷量预警分析,发现全国只有8省(自治区、直辖市)污染负荷量对环境尚未构成潜在威胁,其余省份理论上对环境均构成潜在威胁;杨飞等^[9]的研究表明,现今中国耕地负荷的畜禽N养分平均已达 $138.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,其中四川、海南、贵州、北京、云南、广东等均已达到 $202.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远超粪肥氮施用警戒线 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[30],其他大部分省区也即将达到这个规定值;耿维等^[7]指出,2009年中国农用地N养分平均负荷为 $43.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,北京等6省市农地氮负荷超标,同时考虑化肥施用的影响,约有20个

省超过本省50%环境容量.这些诸多学者主要从畜禽粪尿污染量、畜禽粪尿中氮素养分量、农田氮负荷以及氮超负荷对环境威胁评价等方面作了深入探讨,但是这些研究均较少考虑畜禽粪尿在处置、利用和归田过程中的损失^[2,18,31~33],和对畜禽粪尿还田后的氮负荷及其氮还田潜力研究较少.

为此,本研究分析了1978~2016年中国畜禽粪尿猪粪当量(N)的变化规律,以及各类畜禽对此的贡献比例状况,分析其纵向发展趋势,以2016年为横向剖面,分析了中国畜禽粪尿的来源结构和空间分布状况,以及各省(自治区、直辖市)农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)、纯氮负荷量,并对此进行畜禽粪尿负荷量预警分析,以期为中国各省区畜禽养殖总量控制、合理布局和粪污的综合利用提供决策依据.同时,为推动中国农业可持续发展^[34,35],利用畜禽粪尿养分替代部分化肥^[3,7,36],进一步探讨了当下中国畜禽粪尿还田后的各省区农用地畜禽粪尿、纯氮负荷量,以及畜禽粪尿还田潜力,以期为实现“减施化肥”和“2020年化肥零增长目标”提供科学依据和参考,并为决策者制定畜禽粪尿资源综合利用政策和措施提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 估算方法

本研究参照中国粮食主产区划分如下区域^[20]: ①东北地区:包括黑龙江、吉林和辽宁;②华北地区:北京、天津、河北、河南、山东、山西;③长江中下游地区:上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西;④西北地区:内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆;⑤西南地区:重庆、四川、贵州、云南、西藏;⑥东南地区:福建、广东、广西、海南.本研究未包括香港、澳门、台湾的数据.

畜禽粪、尿产生量的估算多采用排泄系数法^[37,38].各类畜禽粪尿的年产生量由畜禽饲养量(年末存栏数、年内出栏数)、饲养周期、排泄系数计算而得.参考之前的研究方法^[21],本研究考虑畜禽年内出栏数和年末存栏数的差异,以及各畜禽饲养周期的大小差异,分别确定饲养周期 $\geq 1 \text{ a}$ 和 $\leq 1 \text{ a}$ 畜禽年排泄量的估算方法,同时为避免粪和尿的种类差异,将畜禽粪、尿量分开估算.计算公式如下.

(1) 畜禽粪尿(鲜质)

$$QM_i = \frac{S_i \times P_i \times M_i}{1\ 000} + \frac{H_i \times 365 \times M_i}{1\ 000} \quad (1)$$

$$QM_j = \frac{H_j \times 365 \times M_j}{1\ 000} \quad (2)$$

$$QU_i = \frac{S_i \times P_i \times U_i}{1\ 000} + \frac{H_i \times 365 \times U_i}{1\ 000} \quad (3)$$

$$QU_j = \frac{H_j \times 365 \times U_j}{1\ 000} \quad (4)$$

式中, QM 和 QU 分别为畜禽粪量和尿量, 10^4 t; i 为猪、牛、羊和家禽的种类, j 为马、驴和骡的种类; S 、 H 分别为畜禽年内出栏数、年末存栏数, 10^4 个(或头); P 为饲养周期天数(d), 365 为一年 365 d; M 和 U 分别为畜禽粪和尿日排泄系数, $\text{kg} \cdot (\text{d} \cdot \text{个或头})^{-1}$; 10^3 为转换系数。

(2) 畜禽粪尿氮(N)、猪粪当量(N)

$$TN_{ij} = QM_{ij} \times MN_{ij} + QU_{ij} \times UN_{ij} \quad (5)$$

$$TPN_{ij} = QM_{ij} \times MEN_{ij} + QU_{ij} \times UEN_{ij} \quad (6)$$

式中, TN 为畜禽粪尿 N 养分量, 10^4 t; TPN 为畜禽粪尿猪粪当量(N), 10^4 t; QM 和 QU 分别为畜禽粪量和畜禽尿量, 10^4 t; i 为猪、牛、羊、家禽的种类, j 为马、驴、骡的种类, MN 和 UN 分别为畜禽粪和尿的 N 养分含量, %; MEN 和 UEN 分别畜禽粪猪粪当量(N)转换系数和畜禽尿猪粪当量(N)转换系数。

(3) 畜禽粪尿 N 养分和畜禽粪尿猪粪当量(N) 还田量

$$DN_{ij} = TN_{ij} \times (1 - LN_{ij}) \times Rd_{ij} \quad (7)$$

$$DPN_{ij} = TPN_{ij} \times (1 - LN_{ij}) \times Rd_{ij} \quad (8)$$

式中, DN 为畜禽粪尿 N 养分直接还田量, 10^4 t; DPN 为畜禽粪尿猪粪当量(N)还田量, 10^4 t; Rd 为畜禽粪尿直接还田率, %; LN 为 N 养分损失率, %。

(4) 单位面积畜禽粪尿 N 养分和畜禽粪尿猪粪当量(N)

$$AN = \frac{(\sum_i TN_i + \sum_j TN_j)}{A} \times 10^4 \quad (9)$$

$$ADN = \frac{(\sum_i DN_i + \sum_j DN_j)}{A} \times 10^4 \quad (10)$$

$$APN = \frac{(\sum_i TPN_i + \sum_j TPN_j)}{A} \times 10 \quad (11)$$

$$ADPN = \frac{(\sum_i DPN_i + \sum_j DPN_j)}{A} \times 10 \quad (12)$$

式中, AN 为单位耕地面积(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿 N 养分量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; APN 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿猪粪当量(N), $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; ADN 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿 N 养分还田量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $ADPN$ 为单位耕地面积(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿猪粪当量(N)还田量, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 10^4 和 10 为转换系数, i 为猪、牛、羊、家禽的种类, j 为马、驴、骡的种类, TPN 为畜禽粪尿猪粪当量(N), 10^4 t; A 为耕地面积(或农用地或农作物播种面积), hm^2 。

(5) 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N) 环境分析^[39]

$$r = q/p \quad (13)$$

式中, r 为畜禽粪尿农用地负荷风险指数, r 值越大, 环境对畜禽粪尿承受程度越低, 对环境造成污染的威胁性越大; q 为畜禽粪尿负荷量, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; p 为农用地所需粪尿肥理论计算值, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

根据沈根祥等^[39]的分级方法, 将畜禽粪尿负荷量警报值 r 分为 5 级: $r \leq 0.4$ 为 I 级, 无污染; $0.4 < r \leq 0.7$ 为 II 级, 稍有污染; $0.7 < r \leq 1.0$ 为 III 级, 有污染; $1.0 < r \leq 1.5$ 为 IV 级, 较严重污染; $r > 1.5$ 为 V 级, 严重污染。

在进行分级评价时, 首先需要确定 p 值。Wong 等^[40]的研究认为农用地畜禽粪便猪粪当量(以 N 计)的适宜施用量为 $25 \sim 50 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 沈根祥等^[39]的研究认为蔬菜种植地区猪粪当量(N)有机肥安全施用为 $60 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 粮棉瓜果地区 $42 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 纯粮种植区 $24 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 另外诸多研究者一般认为每公顷土地能够负荷的畜禽粪尿猪粪当量(N)在 $30 \text{ t}^{[12, 41]}$, 如果高出这一水平就会造成污染威胁; 张绪美等^[29]的研究认为以中国南北地理划分线 800 mm 等降水量线(秦岭-淮河-喜马拉雅山东南端一线)为界, 以南以 $45 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 为有机肥最大承载量, 以北则以 $30 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 为最大承载量。本研究在上述诸多研究基础上, 为便于计算, 同时也为最大化地降低畜禽粪尿氮负荷量对土壤的污染风险, 确定全国的 p 值为 $30 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 东北、华北和西北地区的 p 值取 $30 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 长江中下游、西南和东南地区的 p 值为 $45 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

1.2 数据及参数

1.2.1 数据

本研究中畜禽(猪、牛、羊、家禽、马、驴、骡)

年末存栏数和年内出栏数,以及耕地、农用地(主要包括耕地、草地、园地)和农作物播种面积数据取自文献[4,5],其中缺失的某年统计数据采用年均增长率反推算得出^[9].为避免畜禽种类和畜禽养殖量以及农用地年际间变化的影响,本研究以2016年当年数据为基础,并用2010~2016年数据矫正,去除不合理数值.

1.2.2 参数

(1)畜(禽)粪尿日排泄系数

本研究收集、整理和分析大量的文献资料、书

籍或研究报告等,加权均值计算各种畜(禽)的粪、尿日排泄系数(见表1).

(2)畜(禽)粪、尿猪粪当量(N)换算系数

本研究估算的畜(禽)粪、尿量时以鲜质量计,因此在估算畜(禽)粪、尿N养分含量也是以鲜基计.本研究通过收集、整理和分析大量相关文献资料、书籍或研究报告等,加权均值计算出各种畜(禽)的粪、尿的氮(N)养分含量,并根据各畜禽粪、尿的N养分含量计算出各种粪尿的猪粪当量(N)换算系数(见表1).

表1 畜禽的粪、尿日排泄量(鲜基)及其N养分含量(鲜基)和猪粪当量(N)换算系数

Table 1 Daily manure/urine excretion by a variety of livestock and poultry (fresh) and their nitrogen nutrient content and pig manure equivalent coefficient

畜禽	类型	日排泄量 ^[21] /kg·(d·个或头) ⁻¹	N 养分含量 ^[21] /%	猪粪当量换算系数 (以N计)
猪	粪	2.71	0.55	1.00
	尿	3.86	0.18	0.32
牛	粪	24.87	0.38	0.70
	尿	11.70	0.51	0.93
羊	粪	2.09	1.01	1.82
	尿	0.64	0.70	1.27
家禽	粪	0.12	0.81	1.46
马	粪	11.46	0.44	0.81
	尿	4.55	0.72	1.31
驴	粪	7.77	0.49	0.89
	尿	3.75	0.71	1.29
骡	粪	7.77	0.32	0.57
	尿	3.75	0.60	1.09

(3)畜(禽)饲养周期

畜(禽)饲养周期指畜(禽)被饲养的天数(d),因畜(禽)种类及其用途的差异,其饲养天数大不相同.一般生产周期大于一年(1a)的,按365d计算,生产周期小于1a的,按实际饲养天数计算.

本研究通过汇总文献[42]中的畜禽(猪、牛、羊、家禽、马、驴和骡)饲养周期,1978~2016年畜禽饲养周期见表2,以2016年当年数据为基础,并用2010~2016年数据矫正,去除不合理数值,2016年各省不同畜禽饲养周期见表3,其中马、驴、骡饲养周期取大于365d.

(4)畜禽粪尿还田率

本研究通过收集、整理和分析现有的文献资料、书籍或研究报告等,加权均值计算2016年各省份不同畜(禽)粪尿还田率(见表4).

(5)畜禽粪尿养分损失率

从养分循环利用角度考虑,畜禽粪尿还田利用,是一种最为经济的资源化利用和处置方式,但由于资源化利用技术落后、产业化水平滞后等各种因素的制约,受困于资金、技术的限制,畜禽粪尿在施到农田之前通常要经历“排泄-清扫-储存-处理(堆积、高温堆肥或厌氧发酵)-运输和转移”过程^[28,31],在处置、利用过程中氮磷钾养分损失较大^[2,18,31~33],不可避免地造成畜禽粪尿N养分的损失,猪、牛、羊、家禽、马、驴、骡粪尿N养分损失率分别为75%、60%、15%、40%、38%、38%和38%^[43].而用作燃料燃烧的粪便,燃烧后粪便N养分认为是全部损失^[44].

1.3 数据处理

用Microsoft Excel 计算,利用Microsoft Excel、Arcgis10.2.1 软件绘图.

表 2 不同年份不同畜禽饲养期/d

Table 2 Feeding periods of various livestock and poultry types in different years/d

年份	猪	牛	羊	家禽	年份	猪	牛	羊	家禽
1978	192.16	404.13	385.86	66.97	1998	167.67	275.00	298.00	59.50
1979	192.16	404.13	385.86	66.97	1999	155.67	244.00	294.00	58.50
1980	192.16	404.13	385.86	66.97	2000	158.50	241.00	294.00	57.00
1981	192.16	404.13	385.86	66.97	2001	155.00	254.00	260.00	63.00
1982	192.16	404.13	385.86	66.97	2002	152.50	250.00	278.00	65.00
1983	192.16	404.13	385.86	66.97	2003	153.00	249.00	288.00	64.50
1984	192.16	404.13	385.86	66.97	2004	148.60	324.00	238.00	69.33
1985	192.16	404.13	385.86	66.97	2005	150.25	273.00	224.00	64.67
1986	192.16	404.13	385.86	66.97	2006	150.25	257.00	225.00	67.67
1987	192.16	404.13	385.86	66.97	2007	147.50	247.00	210.00	64.33
1988	192.16	404.13	385.86	66.97	2008	146.50	233.00	210.00	65.00
1989	178.58	389.18	376.75	75.15	2009	146.71	196.69	187.93	67.12
1990	205.73	419.07	394.96	58.78	2010	145.29	193.03	195.79	68.89
1991	171.87	445.61	358.90	56.50	2011	146.34	192.40	196.17	67.18
1992	213.68	433.18	359.90	67.55	2012	147.65	198.74	195.30	65.80
1993	183.47	456.48	409.37	59.94	2013	148.52	194.34	193.49	68.85
1994	181.23	357.31	323.98	58.77	2014	150.27	197.10	194.19	68.70
1995	185.82	347.57	306.29	61.88	2015	148.79	196.08	195.13	69.06
1996	168.90	289.00	364.40	61.00	2016	150.85	200.39	194.81	70.41
1997	168.30	314.32	336.95	61.43					

表 3 2016 年各省份不同畜禽饲养期/d

Table 3 Feeding periods of various livestock and poultry types in different provinces in 2016/d

省份	猪	牛	羊	家禽	省份	猪	牛	羊	家禽
北京	129.8	196.01	194.98	42.77	湖北	155.6	196.01	194.98	74.49
天津	121.64	196.01	194.98	44.92	湖南	176.69	196.01	194.98	54.10
河北	128.82	117.06	182.79	68.42	广东	145.63	196.01	194.98	102.15
山西	160.51	196.01	194.98	41.41	广西	140.4	196.01	194.98	113.61
内蒙古	179.43	196.01	194.98	46.33	海南	163.23	196.01	194.98	101.14
辽宁	153.18	196.01	194.98	51.41	重庆	150.39	196.01	194.98	68.42
吉林	145.75	196.01	194.98	53.93	四川	136.9	196.01	194.98	68.42
黑龙江	139.57	174.84	292.24	54.69	贵州	139.72	196.01	194.98	68.42
上海	108.34	196.01	194.98	68.42	云南	149.00	196.01	194.98	75.41
江苏	131.14	196.01	194.98	68.42	西藏	148.24	196.01	194.98	68.42
浙江	138.54	196.01	194.98	65.45	陕西	159.93	196.54	183.95	68.42
安徽	153.89	196.01	194.98	55.66	甘肃	150.3	196.01	194.98	68.42
福建	154.14	196.01	194.98	113.45	青海	170.02	196.01	194.98	68.42
江西	153.02	196.01	194.98	68.42	宁夏	152.87	335.68	177.67	53.32
山东	116.97	196.01	222.76	44.75	新疆	137.98	111.59	67.31	68.42
河南	135.93	240.38	238.16	46.53					

2 结果与分析

2.1 1978 ~ 2016 年中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量

由于不同畜禽种类的粪、尿中的养分含量差异较大(表 1),肥效差异大不相同,故其农田负荷量差异也较大,因而对各类畜禽粪、尿总量不能通过简单的累加来估算农田畜禽粪便负荷量^[39],为便于计算,根据各畜禽粪、尿的 N 养分

含量,将其统一换算成猪粪当量(N),然后合计成畜禽粪尿猪粪当量(N)来计算^[39].通过计算,1978 ~ 2016 年,中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及 N 养分量总体上呈“快速增加-保持稳定”的变化态势.畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分别从 1978 年的 $178\,255.28 \times 10^4\text{ t}$ 和 $983.60 \times 10^4\text{ t}$ 增加到 2005 年的 $440\,018.19 \times 10^4\text{ t}$ 和 $2\,428.00 \times 10^4\text{ t}$,增幅均为 146.85%,并达到高峰值,2005 ~ 2016 年均呈下降趋势,降幅均为

表 4 2016 年不同省份畜禽粪尿还田率¹⁾/%

Table 4 Return ratio of livestock and poultry in different provinces in 2016/%

省份	大牲畜	猪	羊	家禽	省份	大牲畜	猪	羊	家禽
北京	70.00	70.00	70.00	70.00	湖北	50.00	50.00	50.00	64.94
天津	66.67	66.67	66.67	66.67	湖南	64.94	64.94	64.94	68.43
河北	63.57	70.70	63.57	64.79	广东	56.32	71.60	52.32	52.32
山西	53.25	53.25	60.00	60.00	广西	60.00	71.60	60.00	60.00
内蒙古	68.43	68.43	68.43	68.43	海南	56.16	71.60	52.37	57.39
辽宁	68.00	80.00	67.32	64.25	重庆	50.45	53.50	41.50	64.45
吉林	50.20	50.20	50.20	74.60	四川	66.67	72.29	66.67	66.68
黑龙江	62.80	62.80	62.80	62.80	贵州	67.50	67.50	67.50	67.50
上海	66.42	73.94	66.42	60.46	云南	49.00	49.00	49.00	49.00
江苏	66.42	73.94	66.42	59.34	西藏	58.80	80.70	80.70	80.70
浙江	66.42	73.94	66.42	53.70	陕西	75.10	75.10	75.10	75.10
安徽	76.67	70.23	75.60	50.00	甘肃	80.70	80.70	80.70	80.70
福建	56.16	71.60	52.37	57.39	青海	80.70	80.70	80.70	80.70
江西	60.67	60.67	60.67	60.67	宁夏	75.10	75.10	75.10	75.10
山东	50.75	59.33	58.66	55.60	新疆	75.10	75.10	75.10	75.10
河南	51.62	69.00	69.00	69.00					

1) 数据引自文献[21]; 大牲畜指的是牛、马、驴和骡, 西藏牛粪便为燃烧还田

16.64%, 到 2016 年分别达到 $366\,822.01 \times 10^4\text{ t}$ 和 $2\,024.10 \times 10^4\text{ t}$, 39 年来均增长了 105.78% (图 1). 这主要是由于改革开放以来, 我国农村经济快速发展, 畜禽养殖总量(年末存栏数和年内出栏数)

从 1978 年开始快速增加, 2005 年达到高峰, 2005~2006 年发生畜禽养殖总量呈现突降, 2006 年以来全国猪、牛、羊和家禽养殖总量略微增长, 而马、驴和骡明显下降^[4,5].

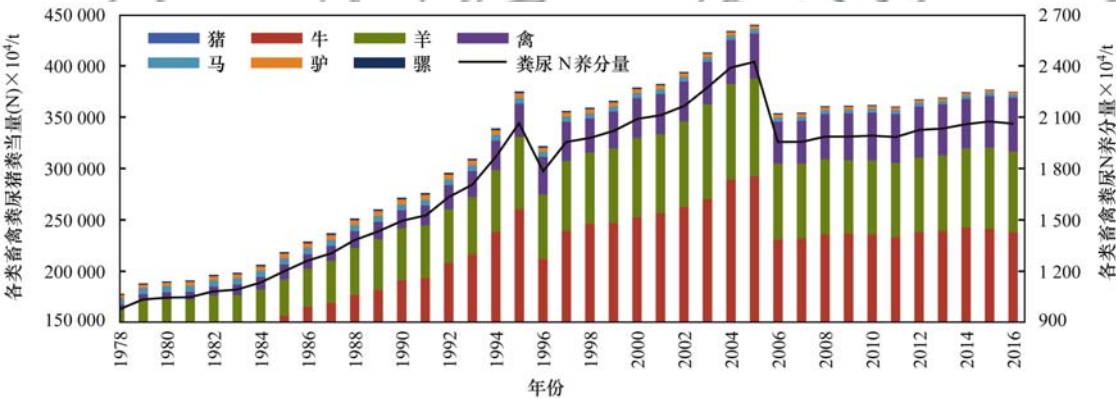


图 1 不同年份中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量

Fig. 1 Quantity of China pig manure equivalent (N) from a variety of livestock and poultry manure and urine and their N for different years

不同种类畜禽粪尿猪粪当量(N)在全国总量中的贡献比例大不相同, 各类畜禽粪尿猪粪当量(N)占总量的比例大小依次为: 牛 > 猪 > 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡, 其各年的粪尿猪粪当量(N)占当年全国的比例分别介于 36.09% ~ 44.85%、23.40% ~ 30.77%、15.97% ~ 22.33%、3.25% ~ 13.52%、0.87% ~ 3.50%、0.62% ~ 2.07% 和 0.17% ~ 0.72% (图 2). 可见, 从 1978 ~ 2016 年, 牛、猪、羊和家禽是我国畜禽粪尿猪粪当量(N)的主要来源, 约占全国总量的 94.03% ~ 98.34%, 而来自马、驴、骡的贡献量极低(图 1).

从各类畜禽粪尿猪粪当量(N)来看, 39 年来各类畜禽粪尿增幅大小依次为: 家禽 > 羊 > 猪 > 牛 > 驴 > 骡 > 马, 家禽、羊、猪和牛均呈增加趋势, 增幅分别为 806.08%、137.03%、86.00% 和 84.24%, 而驴、骡和马均呈下降趋势, 降幅分别为 38.93%、50.14% 和 51.02% (图 2). 可见, 作为肉蛋奶食用的家禽、羊、猪和牛的粪尿猪粪当量(N)是中国畜禽养殖粪尿猪粪当量(N)增长的主要来源, 而作为畜力资源的驴、骡和马养殖的粪尿猪粪当量(N)大幅下降. 各类畜禽粪尿在总量中的比例随时间变化各不相同, 其中家禽粪占比随时间明显

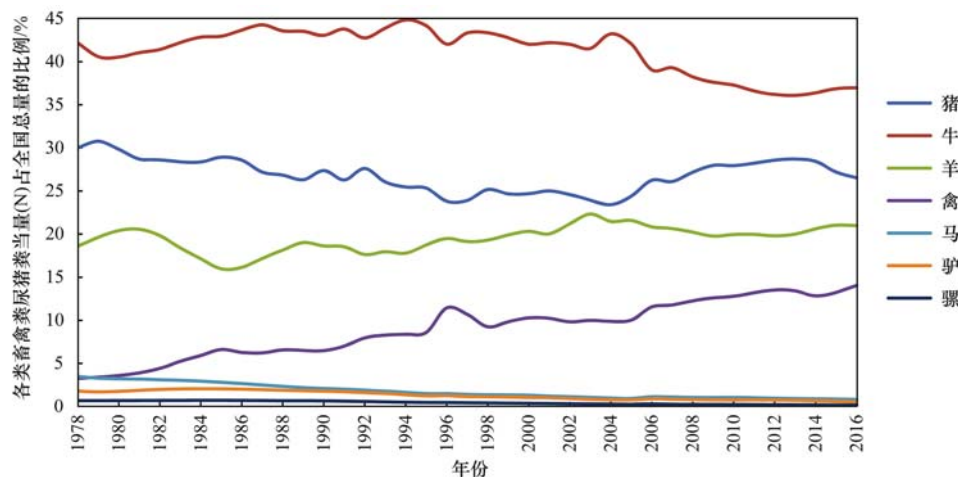


图2 不同年份各类畜禽粪尿猪粪当量(N)占总量的比例

Fig. 2 Ratio of a variety of livestock and poultry pig manure equivalents to the total capacity for different years

上升,牛和猪粪尿占比均呈波动下降趋势,羊粪尿占比保持相对稳定趋势,马、驴、骡粪尿占比均呈明显下降趋势.这些变化趋势和中国畜禽养殖的规模大小及养殖用途有关.

2.2 2016 中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量

上述结果表明,从2006年始至今,中国畜禽粪尿猪粪当量(N)总体呈平稳趋势,为进一步研究当前中国各畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分空间分布情况.以2016年为例,全国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分别为 $366\,822.01 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $2\,024.10 \times 10^4 \text{ t}$.从空间分布分析,全国不同地区及省份的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分别占全国总量的比例大不相同.区域角度上,畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量占全国的比例最大的是华北地区,均为22.25%,其次是西南地区,均为21.01%,然后是西北和长江中下游,而东北和东南地区较低;省级单元上,畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量最高的省份是河南,分别为 $32\,305.44 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $178.26 \times 10^4 \text{ t}$,约占全国总量的8.81%,其次是四川,分别为 $29\,864.52 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $164.79 \times 10^4 \text{ t}$,约占全国总量的8.14%,然后是内蒙古、山东、云南、湖南、河北、辽宁、新疆和湖北,这些省份的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分总量均约占全国的57.96%,而上海、北京和天津粪尿量均较低(图3、表5).这与目前我国畜禽养殖主要分布区相一致^[4,5,17],畜禽养殖高度集中分布导致畜禽粪尿量的高度集中分布.

从各畜禽产生的粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量的角度来看,全国各类畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量差异较大,其大小顺序依次为:牛 > 猪

> 羊 > 家禽 > 马 > 驴 > 骡,其畜禽粪尿猪粪当量(N)分别为 $137\,251.16 \times 10^4$ 、 $97\,844.17 \times 10^4$ 、 $77\,491.77 \times 10^4$ 、 $48\,628.99 \times 10^4$ 、 $3\,053.33 \times 10^4$ 、 $1\,956.58 \times 10^4$ 和 $596.01 \times 10^4 \text{ t}$,其 N 养分量分别为 757.34×10^4 、 539.89×10^4 、 427.60×10^4 、 268.33×10^4 、 16.86×10^4 、 10.79×10^4 和 $3.29 \times 10^4 \text{ t}$ (表5).不同种类畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量在全国的分布也大不相同,64.91%的猪粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在四川、湖南、河南、山东、湖北、云南、广东、广西、河北和江西,59.51%的牛粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在河南、四川、云南、内蒙古、山东、西藏、黑龙江、贵州、吉林和青海,73.14%的羊粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在内蒙古、新疆、山东、河南、四川、甘肃、河北、青海、西藏和云南,70.81%的禽粪猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在山东、河南、广东、广西、辽宁、四川、河北、江苏、湖北和安徽,90.29%的马粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在新疆、内蒙古、四川、贵州、云南、西藏、广西、吉林、黑龙江和青海,90.96%的驴粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在甘肃、内蒙古、新疆、辽宁、河北、云南、吉林、山西、山东和陕西,92.02%的骡粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布在云南、甘肃、内蒙古、河北、四川、辽宁、吉林、山西、青海和广西(图3).其主要是受各地经济发展水平的影响和制约,以及农业资源条件和农业生产方式的不同,畜禽养殖业产生了高度集中化的主产区,不同畜禽品种主产区呈现出明显的地域重合性及空间集中性的特点^[45~47],尤其集中于山东、河北、河南、江苏、四川、安徽、湖北、广东等

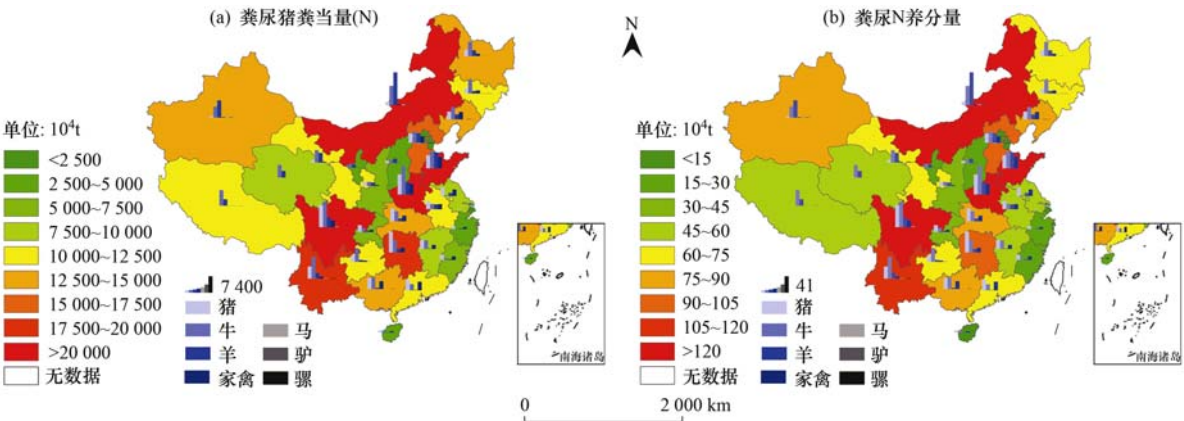


图 3 2016 畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分布

Fig. 3 Spatial distribution of the pig manure equivalent (N) and N of livestock and poultry faeces in 2016

表 5 2016 年不同区域畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量 $\times 10^4/t$

Table 5 Pig manure equivalent (N) and N nutrients of various livestock and poultry faeces in different regions in 2016 $\times 10^4/t$

项目	畜禽	东北地区	华北地区	长江中下游地区	西北地区	西南地区	东南地区	全国
粪尿猪粪当量(N)	猪	8 400.23	20 964.09	28 337.52	5 592.82	21 696.88	12 852.63	97 844.17
	牛	18 121.74	27 468.84	17 092.68	28 545.09	36 374.67	9 648.14	137 251.16
	羊	5 820.12	19 240.56	6 945.28	32 831.27	11 440.66	1 213.88	77 491.77
	家禽	5 698.18	13 417.69	12 666.08	1 507.27	5 787.19	9 552.58	48 628.99
	马	290.99	126.43	32.58	1 131.85	1 329.02	142.46	3 053.33
	驴	306.89	309.29	15.19	1 112.84	212.11	0.26	1 956.58
	骡	49.27	74.48	3.12	225.72	230.75	12.67	596.01
	总计	38 687.42	81 601.38	65 092.45	70 946.86	77 071.28	33 422.62	366 822.01
N 养分量	猪	46.35	115.68	156.36	30.86	119.72	70.92	539.89
	牛	99.99	151.57	94.32	157.51	200.71	53.24	757.34
	羊	32.12	106.17	38.32	181.16	63.13	6.70	427.60
	家禽	31.44	74.04	69.89	8.32	31.93	52.71	268.33
	马	1.61	0.70	0.18	6.25	7.33	0.79	16.86
	驴	1.69	1.71	0.08	6.14	1.17	0.00	10.79
	骡	0.27	0.41	0.02	1.25	1.27	0.07	3.29
	总计	213.47	450.28	359.17	391.49	425.26	184.43	2 024.10

地. 这和刘爱民等^[45]关于不同种类畜禽养殖规模化程度地域差异的研究结果相一致.

2.3 2016 年中国畜禽粪尿猪粪当量(N)负荷及其预警和 N 养分负荷分析

长期以来, 畜禽粪尿是我国农田有机肥养分的主要来源, 农田也是消纳畜禽粪尿的所含养分的主要承载场所. 仅用畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量的空间分布不能完全说明我国各地(省、自治区和直辖市)的分布特点, 因此, 需要通过计算单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量, 来直接反映畜禽养殖产生的畜禽粪尿对各地农用地土壤的污染风险^[28,48], 这也是间接衡量当前条件下各地区畜禽养殖密集程度和养殖业布局合理程度的重要指标^[49]. 同时, 为进一步全面反映中国各地的畜禽粪尿氮负荷量是否过载, 以及对环境是否构成污染威胁等问题, 需要对全国各省(自治区、直辖市)的畜禽粪尿负荷量进行警报值估算与分级评价.

通过计算, 若畜禽粪尿承载场所为耕地时, 全国单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量分别为 $27.19 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $150.02 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, r 值为 0.91, III级, 有污染. 区域角度来看, 单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量较大的是西南和东南地区, 其次是华北地区, 然后是西北和长江中下游地区, 而东北地区最低; 从 r 值和分级评价角度来看, 最大的IV级、较严重污染的是华北地区, 其次III级、有污染的是西北、西南和东南地区, 然后II级、稍有污染的是长江中下游和东北地区. 省级单元上, 单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量最大的是西藏、其次是青海, 然后是湖南、广东、四川、北京、河南和福建, 而黑龙江、山西、浙江和陕西较低; 从 r 值和分级评价角度来看, V级、严重污染的是青海和西藏, 其次IV级、较严重污染的是北京、河南、山东和湖南, 而最低的I级、无污染的是黑龙江、浙江、山西和安徽(表6).

表 6 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N) 负荷及其警报分级和单位面积粪尿 N 养分量
Table 6 Pig manure equivalent loading rate per unit area of livestock and poultry faeces
and its alarm classification and N nutrients per unit area of faeces

地区/省份	耕地面积				农作物播种面积				农用地面积			
	当量			N 养分量 /kg·hm ⁻²	当量			N 养分量 /kg·hm ⁻²	当量			N 养分量 /kg·hm ⁻²
	当量(N) /t·hm ⁻²	r	分级		当量(N) /t·hm ⁻²	r	分级		当量(N) /t·hm ⁻²	r	分级	
全国	27.19	0.91	Ⅲ	150.02	22.01	0.73	Ⅲ	121.46	9.91	0.33	I	54.68
黑龙江	8.14	0.27	I	44.94	10.39	0.35	I	57.32	7.60	0.25	I	41.95
吉林	15.66	0.52	Ⅱ	86.43	19.30	0.64	Ⅱ	106.49	15.05	0.50	Ⅱ	83.07
辽宁	29.80	0.99	Ⅲ	164.45	36.48	1.22	Ⅳ	201.29	27.67	0.92	Ⅲ	152.68
东北地区	13.91	0.46	Ⅱ	76.74	17.45	0.58	Ⅱ	96.30	13.06	0.44	Ⅱ	72.09
北京	42.98	1.43	Ⅳ	237.18	61.43	2.05	V	338.94	34.56	1.15	Ⅳ	190.71
天津	27.72	0.92	Ⅲ	152.98	25.28	0.84	Ⅲ	139.48	25.74	0.86	Ⅲ	142.05
河北	25.83	0.86	Ⅲ	142.52	19.32	0.64	Ⅱ	106.61	21.02	0.70	Ⅱ	115.99
河南	39.83	1.33	Ⅳ	219.78	22.32	0.74	Ⅲ	123.17	37.23	1.24	Ⅳ	205.44
山东	33.87	1.13	Ⅳ	186.92	23.48	0.78	Ⅲ	129.58	31.07	1.04	Ⅳ	171.46
山西	11.20	0.37	I	61.82	12.22	0.41	Ⅱ	67.41	10.22	0.34	I	56.40
华北地区	30.28	1.01	Ⅳ	167.09	21.19	0.71	Ⅲ	116.91	27.05	0.90	Ⅲ	149.26
上海	22.83	0.51	Ⅱ	126.00	14.78	0.33	I	81.58	20.99	0.47	Ⅱ	115.80
江苏	18.46	0.41	Ⅱ	101.85	10.99	0.24	I	60.65	17.52	0.39	I	96.69
浙江	14.11	0.31	I	77.86	12.25	0.27	I	67.59	11.15	0.25	I	61.50
安徽	17.95	0.40	I	99.02	11.84	0.26	I	65.33	17.06	0.38	I	94.13
湖北	27.14	0.60	Ⅱ	149.75	18.15	0.40	I	100.14	23.68	0.53	Ⅱ	130.69
湖南	45.22	1.00	Ⅳ	249.51	21.33	0.47	Ⅱ	117.72	38.78	0.86	Ⅲ	213.99
江西	32.15	0.71	Ⅲ	177.39	17.82	0.40	I	98.33	27.65	0.61	Ⅱ	152.56
长江中下游地区	25.95	0.58	Ⅱ	143.21	15.75	0.35	I	86.89	23.14	0.51	Ⅱ	127.70
内蒙古	28.14	0.94	Ⅲ	155.26	32.88	1.10	Ⅳ	181.45	4.43	0.15	I	24.42
陕西	14.46	0.48	Ⅱ	79.79	13.49	0.45	Ⅱ	74.43	7.63	0.25	I	42.10
宁夏	27.35	0.91	Ⅲ	150.90	27.64	0.92	Ⅲ	152.51	12.08	0.40	I	66.66
甘肃	22.53	0.75	Ⅲ	124.32	28.45	0.95	Ⅲ	157.01	10.28	0.34	I	56.71
青海	153.43	5.11	V	846.59	161.10	5.37	V	888.93	2.18	0.07	I	12.05
新疆	27.71	0.92	Ⅲ	152.91	24.64	0.82	Ⅲ	135.95	3.45	0.11	I	19.02
西北地区	27.59	0.92	Ⅲ	152.24	29.37	0.98	Ⅲ	162.06	4.31	0.14	I	23.81
重庆	27.99	0.62	Ⅱ	154.47	18.52	0.41	Ⅱ	102.21	24.00	0.53	Ⅱ	132.45
四川	44.36	0.99	Ⅲ	244.75	30.70	0.68	Ⅱ	169.39	15.97	0.35	I	88.14
贵州	24.11	0.54	Ⅱ	133.02	19.51	0.43	Ⅱ	107.67	20.35	0.45	Ⅱ	112.29
云南	31.44	0.70	Ⅱ	173.50	27.24	0.61	Ⅱ	150.33	26.72	0.59	Ⅱ	147.43
西藏	227.11	5.05	V	1253.19	391.52	8.70	V	2160.40	1.42	0.03	I	7.83
西南地区	37.97	0.84	Ⅲ	209.51	29.25	0.65	Ⅱ	161.40	7.32	0.16	I	40.39
福建	39.06	0.87	Ⅲ	215.52	22.43	0.50	Ⅱ	123.75	24.51	0.54	Ⅱ	135.24
广东	44.37	0.99	Ⅲ	244.84	23.95	0.53	Ⅱ	132.16	30.49	0.68	Ⅱ	168.26
广西	32.04	0.71	Ⅲ	176.78	22.91	0.51	Ⅱ	126.43	24.68	0.55	Ⅱ	136.20
海南	35.31	0.78	Ⅲ	194.85	31.00	0.69	Ⅱ	171.05	28.21	0.63	Ⅱ	155.69
东南地区	36.88	0.82	Ⅲ	203.52	23.66	0.53	Ⅱ	130.55	26.67	0.59	Ⅱ	147.15

若考虑到作物种植的复种指数时，即畜禽粪尿承载场所为农作物播种面积时，全国单位农作物播种面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量分别为22.01 t·hm⁻²和121.46 kg·hm⁻²，r值为0.73，Ⅲ级，有污染。区域角度来看，单位农作物播种面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量较大的是西北和西南地区，其次是东南和华北地区，而东北和长江中下游地区较低；从r值和分级评价角度来看，

最大的Ⅲ级、有污染的是西北和华北地区，其次Ⅱ级、稍有污染的是西南、东南和东北地区，最低的Ⅰ级、无污染的是长江中下游地区。省级单元上，单位农作物播种面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量最大的是西藏、其次是青海，然后是北京、辽宁、内蒙古、海南、四川和甘肃，而黑龙江、江苏、安徽、山西、浙江、陕西、上海较低；从r值和分级评价角度来看，V级、严重污染的是西藏、青

海和北京,其次Ⅳ级、较严重污染的是辽宁和内蒙古,然后Ⅲ级、有污染的是甘肃、宁夏、天津、新疆、山东、河南,而最低的Ⅰ级、无污染的是黑龙江、江苏、安徽、浙江、上海、江西和湖北(表6)。

若考虑到畜禽粪尿还田的场所中包括耕地、草地、茶园和果园地时,即畜禽粪尿承载场所为农用地时,全国单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量分别为 $9.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $54.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, r 值为0.33,Ⅰ级、无污染。区域角度来看,单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量较大的是华北和东南地区,其次是长江中下游地区,而东北、西南和西北地区较低;从 r 值和分级评价角度来看,最大的Ⅲ级、有污染的是华北地区,其次Ⅱ级、稍有污染的是东南、长江中下游和东北地区,最低的Ⅰ级、无污染的是西南和西北地区。省级单元上,单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量最大的是湖南,其次是河南,然后是北京、山东、广东和海南,而西藏、青海、新疆和内蒙古较低;从 r 值和分级评价角度来看,最大的Ⅳ级、较严重污染的是北京、山东和河南,其次Ⅲ级、有污染的是辽宁、天津和湖南,然后Ⅱ级、稍有污染的是海南、云南、广东、广西、福建、贵州、河北、吉林、重庆、湖北、江西和上海,其他省份为Ⅰ级、无污染(表6)。

综上所述,我国多数省份的单位耕地面积(或播种面积或农用地面积)畜禽粪尿猪粪当量(N)量分别介于 $14 \sim 45$ 、 $12 \sim 33$ 和 $7 \sim 31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于农用地畜禽粪肥的最高适宜施用量 $50 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[40],符合农田畜禽粪肥的适宜施用量 $25 \sim 50 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[40];部分省份的单位耕地面积(或播种面积或农用地面积)畜禽粪尿猪粪当量(N)量高于纯粮种植区猪粪当量(N)有机肥安全施用量 $24 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[39],具有一定的污染风险。同时,由于作物种植结构、种植制度的不同^[4,5],畜禽粪尿肥的区域性集中分布,多分布于农业资源较为丰富或经济发展程度较高的省份^[21],以及粪尿肥难以长距离运输,并且畜禽粪尿肥难以均匀施入农田,全国及各省份局部地区也可能出现畜禽粪尿污染风险。

2.4 畜禽粪尿猪粪当量(N)、N养分还田量及其还田潜力

目前,畜禽粪尿处理的主要途径是作为有机肥还田^[10,29],现实中畜禽粪尿肥还田不仅归还到耕地中,还包括园地、草地等农用地。同时,由于全国

各省(自治区、直辖市)农用地所处的地理环境、气候、种植制度、种植条件、农事活动和社会经济发展水平等的不同,各地畜禽粪尿还田率大不相同(表4),而且畜禽粪尿在施到农田之前通常要经历“排泄-清扫-储存-处理(堆积、高温堆肥或厌氧发酵)-运输和转移”过程^[28,31],在处置、利用过程中氮养分损失较大^[2,18,31~33]。通过计算,2016年全国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量分别为 $113480.75 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $626.15 \times 10^4 \text{ t}$ 。折合成单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量分别为 $3.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从空间尺度上分析(图4),全国各区域及各省(自治区、直辖市)单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量差异较大。从区域角度来看,华北地区的单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量最大,分别为 $8.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是东南地区,分别为 $6.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $37.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后是长江中下游地区,分别 $6.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $33.74 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而西北和西南地区均较低;从省级单元角度来看,最高的是北京,分别为 $11.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是河南,分别为 $10.93 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60.29 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,然后是湖南(单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N) $9.80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,单位农用地畜禽粪尿N养分量 $54.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,下同)、山东($9.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $51.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、辽宁($9.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $50.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),而西藏、青海、新疆和内蒙古较低,这主要是由于这些省份具有较大面积的草地。可见,中国各省区单位农用地畜禽粪尿还田量均低于沈根祥等^[39]的研究认为最低的猪粪当量(N)有机肥安全施用标准,即纯粮种植区 $24 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,单位农用地还田的粪尿N养分量远低于欧盟农业政策规定土壤粪肥施N养分量上限 $170 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[30],表明我国各省区农用地均具有较高的畜禽粪尿N养分还田潜力。

在估算畜禽粪尿还田潜力时,考虑到化肥使用、秸秆肥还田和农作物需肥量等因素,本研究根据各种作物单位经济产量所吸收氮养分的数量^[20]及其单位面积经济产量估算^[4,5]和全国农用地面积^[4,5]估算出全国单位农用地作物氮吸收量约为 $214 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,同时考虑农田畜禽粪尿N养分理论最大适宜量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[50]和欧盟农业政策规定耕地土壤粪肥年施N养分量上限 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[30]。在此,本研究确定中国各地畜禽粪肥N养分还田量最大值为 $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,设为最大环境容量(100%),

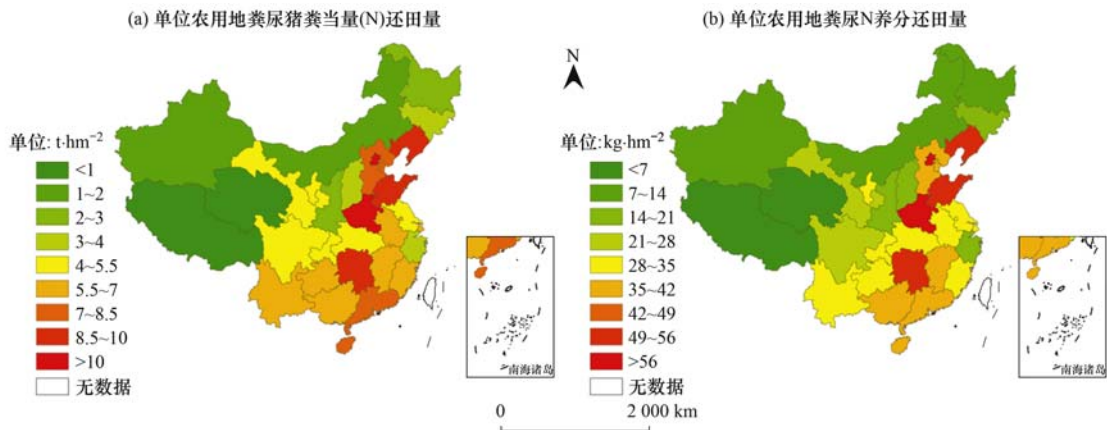


图 4 2016 单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分还田量分布

Fig. 4 Spatial distribution of the pig manure equivalent quantity (N) and N of livestock and poultry faeces returning to the unit area of farmland in 2016

另设 75% 环境容量($127.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、50% 环境容量($85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 40% 环境容量($68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。通过计算,由图 5 可知,全国及其各地区的畜禽粪尿 N 养分还田量远小于最大环境容量。全国粪尿 N 养分还田量约占最大环境容量的 9.95%;区域角度上,畜禽粪尿 N 养分还田量占最大环境容量最高的是华北地区,为 26.84%,其次是东南和长江中下游地区,分别为 21.77% 和 19.85%,然后是东北地区,为 12.44%,而西北和西南地区均较低,分别为 6.30% 和 6.06%;省级单元上来看,畜禽粪尿 N 养分还田量占最大环境容量最高的是北京,为 36.60%,其次是河南,为 35.47%,然后是湖南、山东和辽宁,分别为 31.80%、30.11% 和 29.43%,

而西藏、青海、新疆和内蒙古均较低,这些省份具有较大的草地面积,且当地生态环境相对较为脆弱。

在估算各地畜禽粪尿 N 养分还田潜力时,考虑到种植业保持高产的需要,也考虑到化肥的施用,假定环境容量 50% 比例与实际养管理需求更为接近,这也对各地控制畜禽养殖总量及合理调整养殖布局更具有参考价值^[7,51]。当畜禽粪尿 N 养分还田量达到最大环境容量 50% ($85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 时,全国可增加的畜禽粪尿 N 养分量还田量为 $2\,520.21 \times 10^4 \text{ t}$, 约占 2016 年化肥 N 消费量的 85.28%, 也表明我国具有极高的化肥 N 的“减肥”潜力,同时这远高于我国当年畜禽养殖产生的粪尿 N 养分量,

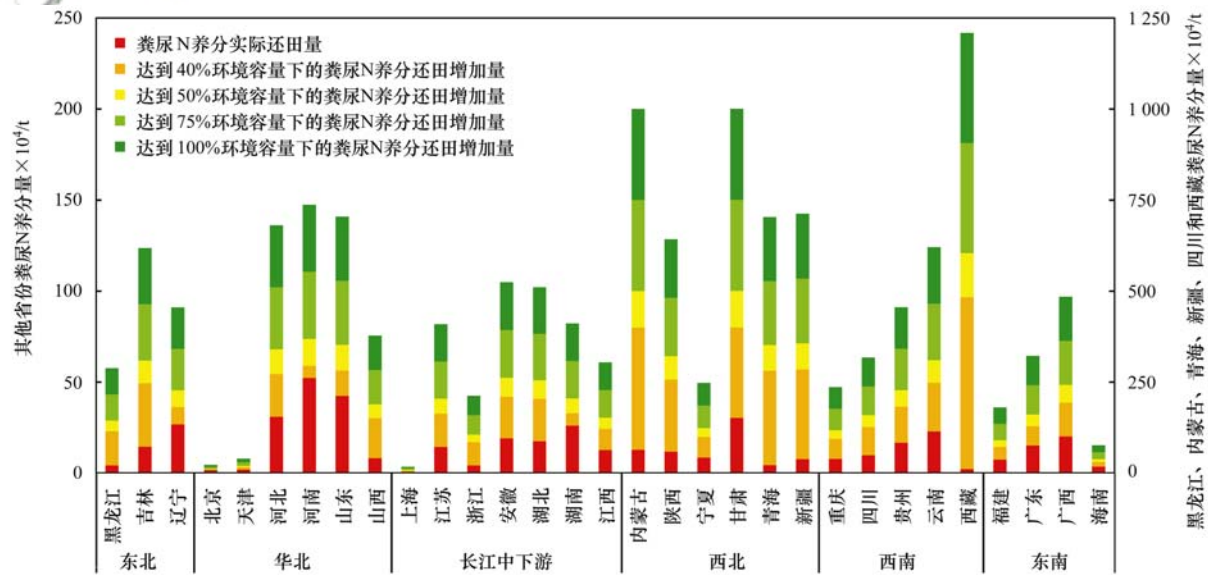


图 5 还田潜力达到 40%、50%、75% 和 100% 环境容量下的畜禽粪尿 N 养分还田增加量

Fig. 5 Increase of N returning to farmland from livestock and poultry faeces when the return potential reaches 40%, 50%, 75%, and 100% of the environmental capacity

进一步说明了从全国范围来看畜禽粪尿 N 养分量可以全部均匀施用到农用地,但是,由于畜禽粪尿 N 养分量分布集中、难以长距离运输、施用不均、肥效缓慢等问题,致使畜禽粪尿肥还田率较低,且在局部地区存在较高的污染风险。从可增加的畜禽粪尿 N 养分还田量空间分布角度来看,区域上最高是西北地区,其次是西南地区,这主要是由于这 2 个区域具有较大面积的草场,但是由于草地生态相对较为脆弱,不建议过多增加畜禽粪尿 N 养分还田量,其次是东北、长江中下游和华北地区,分别为 189.11×10^4 、 144.16×10^4 和 118.80×10^4 t,东南地区最低,为 60.15×10^4 t;从粮食主产区的省份来看,畜禽粪尿 N 养分还田量增加潜力较高的是黑龙江,为 123.08×10^4 t,其次是四川,为 109.49×10^4 t,然后是河北、湖北、安徽和山西等省份;在经济较为发达的上海、北京和天津,畜禽粪尿 N 养分还田量增加潜力较低,均不高于 2.1×10^4 t。

3 讨论

3.1 与其他研究者估算方法差异性分析

1978 年以来,中国畜禽养殖业迅速发展,由规模化、集中化养殖产生的粪尿排放问题越来越突出,粪尿量超出了土地的消纳能力,若没有足够的农田资源进行畜禽养殖废弃物的消纳,很容易对环境造成严重污染^[14,52]。目前,关于畜禽粪尿猪粪当量(N)负荷、粪尿 N 养分负荷方面的研究较多^[53~55],但因不同地域环境保护要求、耕作制度、施肥习惯和方式等存在一定的差异,研究结果差异较大。王方浩等^[28]通过比较和筛选畜禽排泄系数和粪便养分参数,求得平均值,并选择合理的畜禽数量,折算出 2003 年中国主要畜禽养殖产生的粪便量(鲜重)为 31.90×10^8 t,畜禽粪便及其中的 N 养分平均耕地负荷分别为 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $107 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张田等^[56]选择适当的参数及当年数据,根据各种畜禽饲养量、饲养周期以及排泄系数的计算,结果表明,2009 年中国畜禽养殖业粪便排放总量(以鲜重计)为 32.64×10^8 t,全国单位面积农用地畜禽粪便负荷为 $26.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,N 养分负荷为 $158.42 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。仇焕广等^[57]结合宏观统计数据 and 实地调研数据,估算得 2010 年我国畜禽粪便排放总量为 19.00×10^8 t,形成污染的畜禽粪便量为 2.27×10^8 t,全国单位面积耕地畜禽粪便负荷量为 $1.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。耿维等^[7]以环境保护部、统计局和农业部发布的区域畜禽产排污系数为基础,利用

2010 年的统计数据,估算结果表明,2010 年中国畜禽粪便总量达 22.35×10^8 t,全国单位面积农用地 N 养分平均负荷为 $43.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。上述不同的研究者估算结果差异较大,其主要是由于所需参数和估算方法的不同,以及对畜禽粪尿污染的评价标准大不相同,同时也没有考虑到畜禽粪尿实际还田过程中的损失情况^[43],以及粪尿施用到农田所考虑的土地承载场所面积的不同所致。现有研究多以耕地面积为消纳场所计算粪便 N 污染负荷,对不同土地种植模式和农田复种指数考虑不足^[29,58,59],致使计算结果难以真实地反映局部地区畜禽粪便负荷。本研究畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分分量的估算是依据中国官方统计数据 and 农业部的各类畜禽年内出栏数、年末存栏数,以及各类畜禽的饲养周期,利用排泄系数法^[37,38]进行估算而得,同时考虑到粪尿还田过程中氮的损失情况,进一步估算了还田的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量;在对全国及各地区畜禽粪尿氮负荷量分级评价时,分别考虑了耕地、农作物播种面积和农用地这 3 种承载场所的情况;在粪尿养分还田时考虑了粪尿氮的损失情况。

3.2 中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分负荷空间分布

1978 年以来,我国畜禽养殖总量较大,传统的畜牧养殖业生产多是以农家个体饲养为主,一般畜禽养殖头数不多,产生的粪尿相对较少,作为重要的有机肥,产生的畜禽粪尿多是就地施用,不会产生严重的环境污染^[60]。随着畜禽养殖业的快速发展,向集约化、规模化生产方式转变,畜禽养殖产生的粪尿及其 N 养分量急剧增长。本研究中,从 1978~2016 年全国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量均增长了 105.78%,分别达到 $366\,822.01 \times 10^4$ 和 $2\,024.10 \times 10^4$ t。并且由于畜禽养殖业的集中分布、“种养分离”,以及化肥的大量使用,畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分若处理不当极可能成为环境污染的重要源头^[24,61]。自然因素、农业技术进步、屠宰加工业的带动、运输成本、非农就业机会、区域经济水平、畜牧业收益、环境压力 and 政策驱动等是中国畜禽养殖区域布局变动的主要影响因素^[9,62~64]。2003~2007 年以来,由于各地区的肉蛋奶的市场分割、人们饮食结构的差异、人们消费习惯的差异、畜禽养殖生产者和当地政府目标收益的不一致,引发的对各地区自身优势利用程度的不同,造成畜牧业发展极不平衡 and 明显的生产结构的

区域化特征^[17,47,65]. 本研究结果表明, 2016 年畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量的空间分布, 区域上最大的是华北地区, 其次是西南地区, 省级单元上最高的是河南, 其次是四川. 仅考虑耕地时, 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量较大的是西南和东南地区, r 值最大的是华北地区, IV 级、较严重污染风险; 考虑农作物复种指数时, 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量较大的是西北和西南地区, 其次是东南和华北地区, r 值较大的是西北和华北地区, III 级、有污染风险; 考虑耕地、草地、茶园和果园时, 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量较大的是华北和东南地区, 其次是长江中下游和东北地区, r 值最大的是华北地区, III 级、有污染风险, 省级单元上单位面积畜禽粪尿猪粪当量(N)及其 N 养分量最大的是湖南, 其次是河南, r 值最大的是北京、山东和河南, IV 级、较严重污染风险. 同时, 考虑到各省内畜禽粪尿分布的集中性和不均匀性, 其他各省份局部地区也具有一定的环境污染风险.

在畜禽粪尿归田过程中, N 养分损失较大, 本研究中, 单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(N)还田量均未达到污染水平. 通常来说, 畜禽粪尿多施用于需肥量较大的瓜果蔬菜用地, 沈根祥等^[39]认为蔬菜种植地区猪粪当量(N)有机肥安全使用为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 粮棉瓜果地区为 $42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 纯粮种植区为 $24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 情景假设, 若 100%、80%、60%、50% 和 25% 的畜禽粪尿猪粪当量(N)全部归还到瓜果蔬菜用地(蔬菜地、瓜类地、果园地)中, 由图 6 可知, 从全国平均来看, 在土壤粪尿猪粪当量(N)安全施用上限范围内, 果蔬用地可以消纳全部实际还田的粪尿猪粪当量(N), 但是由于各省区实际还田的粪尿猪粪当量(N)差异较大, 以及各省区果蔬用地面积差异较大, 绝大多数省区的果蔬用地可以完全消纳实际还田的粪尿猪粪当量(N), 且低于欧盟农业规定的粪尿肥猪粪当量(N)施用安全量. 在东北、西北地区, 果蔬用地难以完全消纳实际还田的粪尿猪粪当量(N), 在畜禽粪尿还田中, 应当优先归还到园林地、瓜类地、蔬菜地以及人工种草地中.

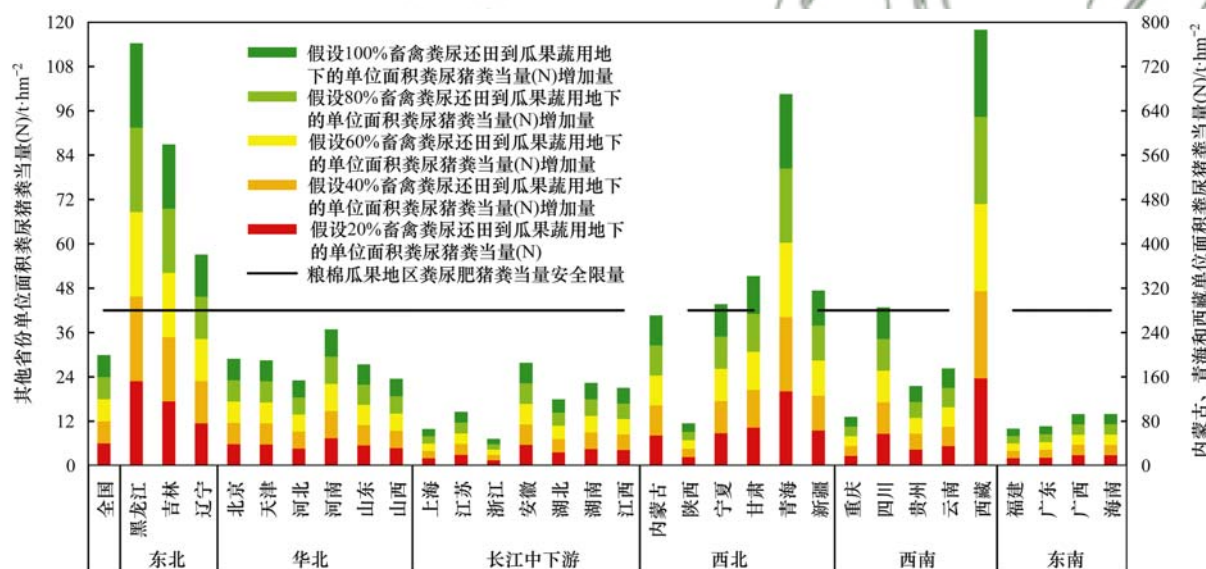


图6 假设 20%、40%、60%、80%、100% 畜禽粪尿还田到瓜类、蔬菜和果园用地情况下的单位面积猪粪当量(N)

Fig. 6 Pig manure equivalent (based on N) per unit area assuming scenarios of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% of livestock and poultry faeces returning to vegetable, melon, and fruit fields

3.3 问题及建议

1978 年以来, 我国畜禽养殖量迅速增加、畜禽养殖业向集约化、规模化发展, 产生大量的畜禽粪尿及其 N 养分量; 其次, 化肥的大量施用、农业劳动力的成本提高等因素影响, 导致“种养结合”农业生产方式的分离与脱节; 然后, 用来消纳粪尿场所的中国农用地增加的可能性很低; 并且各地政府环保政策, 民众环保意识, 以及粪尿处理技术的不到

位, 畜禽粪尿固液混杂, 污染物含量高, 随意倾倒或排放, 产生了严重的环境问题^[57,66]. 同时畜禽养殖业属于微利行业, 粪尿污染治理工程投入大, 地方企业无力承担, 所以更增加了治理难度^[60]. 为此, 提出以下 5 点建议: ①鼓励有机肥生产企业的建厂生产, 加大有机肥生产补贴政策, 加强宣传环保培训工作, 大力发展种养结合农业, 鼓励农户使用商品有机肥. ②在粪尿负荷量较高的地区, 在经

济发达的省区,如北京、上海、天津等地,限制当地畜禽养殖业规模,划分养殖区;在农业资源较丰富的省区,如四川、河南、山东等地,大力推广“公司+农户”的产业化模式,加大种植与养殖结合力度. ③而在牧区,如西藏、青海、内蒙古等,虽然畜禽粪尿负荷量较低,但是由于生态较为脆弱,规划散养放牧区和集中养殖区,对产生的粪尿集中处理,推进沼气工程建设,引进有机肥生产加工以及沼渣沼液利用相结合的处理方式. ④研究并推广高蛋白、低磷、低重金属含量的饲料,减少粪尿中其他污染物,并降低其污染负荷量,避免更高的污染风险,并开展畜禽粪尿替代化肥的比例研究. ⑤开展畜禽粪尿还田时的养分和有害物质如重金属等的安全限量标准研究,建立一个既考虑作物需求,又兼顾土壤对畜禽粪尿养分承载的最大负荷量,针对不同土壤和作物制定安全施用技术规范.

4 结论

(1)1978~2016年,中国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量总体上呈“快速增加(1978~2005年)-保持稳定(2006~2016年)”的变化态势. 到2016年,分别达到 $366\,822.01 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $2\,024.10 \times 10^4 \text{ t}$,均增长了105.78%. 家禽、羊、猪和牛约占全国畜禽粪尿量的94.03%~98.34%,且随时间呈增加趋势,驴、骡和马的粪尿量占比极低,且随时间大幅下降.

(2)2016年畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量最大的区域是华北地区,其中河南为最,分别为占全国总量的22.25%和8.81%. 河南、四川、内蒙古、山东、云南、湖南、河北、辽宁、新疆和湖北的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量约占全国总量的57.96%.

(3)按耕地、作物播种面积和农用地面积分别计算单位面积上的畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分量,并进行r值分级和环境风险评价. 如果承载场所为耕地,负荷量较大的是西南和东南地区,污染风险较严重的是华北地区,为Ⅳ级;若按农作物种植面积,西北和西南地区负荷量较大,西北和华北地区为Ⅲ级有污染风险;若按农用地计算,华北和东南地区负荷量较大,华北地区Ⅲ级有污染风险,湖南负荷量最大,北京、山东和河南为Ⅳ级较严重污染风险.

(4)2016年全国畜禽粪尿猪粪当量(N)及其N养分还田量分别为 $113\,480.75 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $626.15 \times$

10^4 t . 按单位农用地面积计算分别相当于 $3.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 区域上华北地区最大,分别为 $8.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,省级单元上最高的是北京,分别为 $11.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

(5)若按50%的粪尿N养分环境容量($85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)计算,全国可增加的N养分还田量为 $2\,520.21 \times 10^4 \text{ t}$,区域上还田潜力最高的是西北地区,粮食主产区上还田潜力最高的是黑龙江,为 $123.08 \times 10^4 \text{ t}$,其次是四川,为 $109.49 \times 10^4 \text{ t}$,而上海、北京和天津不宜增加粪尿N养分还田量.

参考文献:

- [1] Zheng C H, Liu Y, Bluemling B, *et al.* Modeling the environmental behavior and performance of livestock farmers in China: an ABM approach [J]. *Agricultural Systems*, 2013, **122**: 60-72.
- [2] 高懋芳,邱建军,李长生,等. 应用Manure-DNDC模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(9): 183-189.
Gao M F, Qiu J J, Li C S, *et al.* Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(9): 183-189.
- [3] 贾伟,李宇虹,陈清,等. 京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(8): 156-167.
Jia W, Li Y H, Chen Q, *et al.* Analysis of nutrient resources in livestock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(8): 156-167.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(1981-2017) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1981-2017.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China statistical yearbook (1981-2017)* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1981-2017.
- [5] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料(1987-2016) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1987-2017.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *China Agricultural Statistical Report (1987-2016)* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1987-2017.
- [6] 翁伯琦,雷锦桂,江枝和,等. 集约化畜牧业污染现状分析及资源化循环利用对策思考[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(S1): 294-299.
Weng B Q, Lei J G, Jiang Z H, *et al.* Present situation analysis of intensive livestock pollution and countermeasures consideration of resource recycling [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(1): 294-299.
- [7] 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 W, Hu L, Cui J Y, *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.
- [8] 张晖. 中国畜牧业面源污染研究——基于长三角地区生猪养

- 殖户的调查[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- Zhang H. A study on non-point source pollution of livestock husbandry in China—based on the surveys of pig breeding farmers in the Yangtze River delta [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [9] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(5): 1-11.
- Yang F, Yang S Q, Zhu Y Q, *et al.* Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(5): 1-11.
- [10] 杨军香, 王合亮, 焦洪超, 等. 不同种植模式下的土地适宜载畜量[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(2): 339-347.
- Yang J X, Wang H L, Jiao H C, *et al.* Stock capacity in different cropping systems [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(2): 339-347.
- [11] 武深树, 谭美英, 龙岳林, 等. 洞庭湖区畜禽粪便中氮素污染及其环境成本[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(6): 229-234.
- Wu S S, Tan M Y, Long Y L, *et al.* Nitrogen pollution and environmental cost of livestock manure in Dongting lake area[J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(6): 229-234.
- [12] 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 J C, Zhang Z Q, Fan Z M, *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.
- [13] Kohyama K, Hojito M, Sasaki H, *et al.* Estimation of the amount of nutrients in livestock manure[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, **52**(4): 576-577.
- [14] 宋大平, 庄大方, 陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 110-116.
- Song D P, Zhuang D F, Chen W. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui province [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 110-116.
- [15] Xiong X, Li Y X, Li W, *et al.* Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, **54**(11): 985-990.
- [16] Zervas G, Tsiplakou E. An assessment of GHG emissions from small ruminants in comparison with GHG emissions from large ruminants and monogastric livestock [J]. Atmospheric Environment, 2012, **49**: 13-23.
- [17] 付强, 诸云强, 孙九林, 等. 中国畜禽养殖的空间格局与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2012, **67**(10): 1383-1398.
- Fu Q, Zhu Y Q, Sun J L, *et al.* Spatial patterns and gravity centers curve of livestock and poultry breeding in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(10): 1383-1398.
- [18] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(8): 230-234.
- Tian Y S. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(8): 230-234.
- [19] 李文哲, 徐名汉, 李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2013, **44**(5): 135-142.
- Li W Z, Xu M H, Li J Y. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, **44**(5): 135-142.
- [20] 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 S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(20): 4207-4229.
- [21] 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 X Y, Li S T. 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.
- [22] Martinez J, Dabert P, Barrington S, *et al.* Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(22): 5527-5536.
- [23] Provolto G. Manure management practices in Lombardy (Italy) [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(2): 145-152.
- [24] Bassanino M, Sacco D, Zavattaro L, *et al.* Nutrient balance as a sustainability indicator of different agro-environments in Italy[J]. Ecological Indicators, 2011, **11**(2): 715-723.
- [25] Song K Y, Li Y, Ouyang W, *et al.* Manure nutrients of pig excreta relative to the capacity of cropland to assimilate nutrients in China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 1846-1855.
- [26] 刘忠, 段增强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. 资源科学, 2010, **32**(5): 946-950.
- Liu Z, Duan Z Q. Distribution of manure resources and environmental loads of agro-ecological regions in China [J]. Resources Science, 2010, **32**(5): 946-950.
- [27] 刘晓利, 许俊香, 王方浩, 等. 我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J]. 河北农业大学学报, 2005, **28**(5): 27-32.
- Liu X L, Xu J X, Wang F H, *et al.* The resource and distribution of nitrogen nutrient in animal excretion in China[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, **28**(5): 27-32.
- [28] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 614-617.
- Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, *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.
- [29] 张绪美, 董元华, 王辉, 等. 中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1311-1318.
- Zhang X M, Dong Y H, Wang H, *et al.* Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1311-1318.
- [30] Henkens P L C M, Van Keulen H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community [J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2001, **49**(2-3): 117-134.
- [31] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积

- 及处理单元氮损失率研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(5): 1068-1077.
- Chang Z Z, Jin H M, Huang H Y, *et al.* Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(5): 1068-1077.
- [32] Nicholson F A, Bhogal A, Chadwick D, *et al.* An enhanced software tool to support better use of manure nutrients: manner-NPK[J]. *Soil Use and Management*, 2013, **29**(4): 473-484.
- [33] Shah G M, Groot J C J, Oenema O, *et al.* Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, **94**(2-3): 299-312.
- [34] 杨世琦, 韩瑞芸, 刘晨峰. 省域尺度下畜禽粪便的农田消纳量及承载负荷研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, **21**(7): 142-151.
- Yang S Q, Han R Y, Liu C F. Study on the given amount per unit field and load capacity of livestock and poultry manure at provincial scale [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, **21**(7): 142-151.
- [35] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(1): 179-184.
- Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(1): 179-184.
- [36] 路国彬, 王夏晖. 基于养分平衡的有机肥替代化肥潜力估算[J]. 中国猪业, 2016, **11**(11): 15-18.
- [37] Cheng H G, Ouyang W, Hao F H, *et al.* The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River Basin in Yellow River [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, **21**(3): 213-221.
- [38] 渠清博, 杨鹏, 翟中葳, 等. 规模化畜禽养殖粪便主要污染物产生量预测方法研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, **33**(5): 397-406.
- Qu Q B, Yang P, Zhai Z W, *et al.* Prediction methods of major pollutants production in manure from large-scale livestock and poultry farms: a review [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, **33**(5): 397-406.
- [39] 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. 上海农业学报, 1994, **10**(S1): 6-11.
- [40] Wong J W C, Ma K K, Fang K M, *et al.* Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong [J]. *Bioresource Technology*, 1999, **67**(1): 43-46.
- [41] 刁晓平, 高娟, 王轶, 等. 海口市畜禽排泄物的环境压力及其影响评价[J]. 农业环境与发展, 2009, **26**(1): 60-63.
- [42] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编(1980-2016) [M]. 北京: 中国统计出版社, 1980-2016.
- [43] Li S T, Liu X Y, Ding W C. Estimation of organic nutrient sources and availability for land application [J]. *Better Crops*, 2016, **100**(3): 4-6.
- [44] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(21): 1-19.
- Liu X Y, Li S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(21): 1-19.
- [45] 刘爱民, 强文丽, 王维方, 等. 我国畜禽养殖方式的区域性差异及演变过程研究[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(4): 552-561.
- Liu A M, Qiang W L, Wang W F, *et al.* Regional differences and evolution of livestock farming patterns in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(4): 552-561.
- [46] 花俊国, 朱香荣, 殷成文. 中国乳业集中状况和空间布局分析[J]. 中国农村经济, 2007, (2): 49-54, 80.
- [47] 夏晓平, 李秉龙, 隋艳颖. 中国畜牧业生产结构的区域差异分析——基于资源禀赋与粮食安全视角[J]. 资源科学, 2010, **32**(8): 1592-1600.
- Xia X P, Li B L, Sui Y Y. Analysis of regional differentiation of Animal husbandry production structure in China from the perspectives of resources endowment and food security [J]. *Resources Science*, 2010, **32**(8): 1592-1600.
- [48] 阎波杰, 潘瑜春, 闫静杰. 基于GIS的安徽省耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算及污染潜势研究[J]. 地球与环境, 2016, **44**(5): 566-571.
- Yan B J, Pan Y C, Yan J J. A study on livestock manure nitrogen load and pollution potential of farmland in Anhui province, China based on GIS [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(5): 566-571.
- [49] 马林, 王方浩, 马文奇, 等. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(8): 170-174.
- Ma L, Wang F H, Ma W Q, *et al.* Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in Northeast China for middle and long period [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, **22**(8): 170-174.
- [50] 王立刚, 李虎, 王迎春, 等. 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 986-992.
- Wang L G, Li H, Wang Y C, *et al.* Changes in livestock operation systems and their contributions to manure nitrogen pollution loading in Xiaoqinghe watershed, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(5): 986-992.
- [51] Mallin M A, Cahoon L B. Industrialized animal production—a major source of nutrient and microbial pollution to aquatic ecosystems [J]. *Population and Environment*, 2003, **24**(5): 369-385.
- [52] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, **25**(2): 311-319.
- Gao D, Chen T B, Liu B, *et al.* Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(2): 311-319.
- [53] 李帷, 李艳霞, 张丰松, 等. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[A]. 见: 第二届全国农业环境科学学术研讨会论文集[C]. 昆明: 中国农业生态环境保护协会, 农业环境与发展编辑部, 2007. 8.
- [54] Zheng N, Fu C. Research on non-point source pollution resulted from livestock breeding in Jiangxi province [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **356-360**: 2344-2348.
- [55] Deng M H, Bellingrath-Kimura S D, Zeng L, *et al.* Evaluation of N environmental risks on andosols from an intensive dairy farming watershed using DNDC [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 659-671.
- [56] 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 T, Bu M D, Geng W. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(5): 1241-1249.
- [57] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2766-2774.
- Qiu H G, Liao S P, Jing Y, *et al.* Regional differences and development tendency of livestock manure pollution in China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2766-2774.
- [58] 孟岑, 李裕元, 许晓光, 等. 亚热带流域氮磷排放与养殖业环境承载力实例研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 635-643.
- Meng C, Li Y Y, Xu X G, *et al.* A case study on non-point source pollution and environmental carrying capacity of animal raising industry in subtropical watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 635-643.
- [59] 黄红英, 常志州, 叶小梅, 等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析——以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013, **29**(4): 777-783.
- Huang H Y, Chang Z Z, Ye X M, *et al.* Estimation of regional livestock manure production and farmland loading capacity: a case study of Jiangsu province [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, **29**(4): 777-783.
- [60] 刘艳丰, 玛依拉·艾尼, 唐淑珍, 等. 畜禽粪便污染现状及其治理[J]. 草食家畜, 2010, (4): 47-49.
- Liu Y F, Mayilaoaini, Tang S Z, *et al.* Pollution of livestock and poultry feces and counter measures [J]. Grass-Feeding Livestock, 2010, (4): 47-49.
- [61] 兰勇, 刘舜佳, 向平安. 畜禽养殖家庭农场粪便污染负荷研究——以湖南省县域样本为例[J]. 经济地理, 2015, **35**(10): 187-193.
- Lan Y, Liu S J, Xiang P A. Quantifying the pollution loading from livestock and poultry of family farm—based on the sample of counties in Hunan province[J]. Economic Geography, 2015, **35**(10): 187-193.
- [62] 张越杰, 田露. 中国肉牛生产区域布局变动及其影响因素分析[J]. 中国畜牧杂志, 2010, **46**(12): 21-24.
- Zhang Y J, Tian L. Analysis on beef cattle production area layout and its influence factors[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2010, **46**(12): 21-24.
- [63] 曹光乔, 潘丹, 秦富. 中国蛋鸡产业布局变迁的经济分析——基于省级面板数据的研究[J]. 农业技术经济, 2010, (10): 10-17.
- Cao G Q, Pan D, Qin F. Economic analysis on changes of layer industry distribution in China—based on provincial panel data [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2010, (10): 10-17.
- [64] 夏晓平, 李秉龙, 隋艳颖. 中国肉羊产地移动的经济分析——从自然性布局向经济性布局转变[J]. 农业现代化研究, 2011, **32**(1): 32-35.
- Xia X P, Li B L, Sui Y Y. An economic analysis on regional change of mutton production in China—transfer from natural layout to economic layout [J]. Research of Agricultural Modernization, 2011, **32**(1): 32-35.
- [65] 杨飞, 吴根义, 诸云强, 等. 中国各省区未来主要畜禽养殖量及耕地氮载荷的预测[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(3): 289-294.
- Yang F, Wu G Y, Zhu Y Q, *et al.* Forecast of livestock and poultry amount and arable land nitrogen load of Chinese provinces [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(3): 289-294.
- [66] 杨军香, 林海. 我国畜牧业环境污染治理的思考与对策[J]. 饲料工业, 2015, **36**(13): 1-4.
- Yang J X, Lin H. Management of pollution caused by animal wastes-consideration and countermeasures [J]. Feed Industry, 2015, **36**(13): 1-4.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)