

述评与讨论

农村污水处理莫轻视“肥水”资源

郝晓地, 于晶伦, 付昆明, 江 翰

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 化肥使用和旱厕卫生瑕疵让粪尿“肥水”变成了“废水”,以至出现农村污水处理问题。在国际上开始强调以生态为核心的蓝色发展之时,重新审视华夏文明五千年创造的粪尿返田习惯,发现它是生态的,在土地与人/畜禽间建立起一种朴素的生态循环。换句话说,粪尿返田与蓝色经济殊途同归。如果以卫生方式帮助农户粪尿返田,不仅让“肥水”不再进入灰水,最大程度减少污水形成、简化(甚至省略)处理过程,而且可以缓解磷危机现象、减少温室气体排放。况且,粪尿返田也是帮助农民发展有机农业、种植绿色作物的一种扶贫方式。基于生态考虑,对粪尿“肥水”中养分价值、源分离粪尿及卫生返田、粪尿返田与有机农业、农村污水处理现状、转变政府投资方式等方面进行论述。

关键词: 农村污水处理; 粪尿返田; 有机农业; 绿色食品; 磷危机; 温室气体

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)20-0005-08

Don't Despise Nutrient during Treating Rural Wastewater

HAO Xiao-di, YU Jing-lun, FU Kun-ming, JIANG Han

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Using chemical fertilizers and sanitation defects of pit toilets made “nutrient water” from excreta become “wastewater”, which resulted in needing rural wastewater treatment. When the international society emphasized the blue development with ecology being its core, excreta returning to farmlands has been thought to be ecological, which was developed and applied by China for almost 5 000 years and established a simply ecological cycle between farmlands and people/livestocks. In other words, all types of excreta returning to farmlands and the blue economy are the same. If farmers are helped in excreta returning to farmlands in a more sanitary way, “nutrient water” would not enter grey water, which could minimize wastewater production and simplify/omit treatment processes. At the same time, the phosphorus crisis and the greenhouse effect could be alleviated. Moreover, excreta returning to farmlands is also a way of poverty alleviation by helping farmers develop organic agriculture and produce green crops. Based on ecological views, nutrient value of excreta, source separation and sanitary returning to

farmlands, excreta returning to farmlands and organic agriculture, situation of rural wastewater treatment and transforming governmental investment modes were all discussed in detail.

Key words: rural wastewater treatment; excreta returning to farmlands; organic agriculture; green food; phosphorus crisis; greenhouse gases

据统计,我国农村生活污水年排放量超过 $90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,近95%的村庄没有排水管渠和污水处理系统,污水一般都是未经处理直接排放^[1]。这种状况不仅造成农村生活环境脏乱差,而且极易对农村水源造成污染,严重影响农村居民的身体健康和生活质量。《农村人居环境整治三年行动方案》指出,改善农村人居环境,建设美丽宜居乡村,是实施乡村振兴战略的一项重要任务。农村生活污水问题需要得到妥善解决,治理任务迫在眉睫。解决农村污水问题目前主流观点是处理,政府也以处理为己任。

在传统农业耕作中,“粪尿返田”之习惯以极为朴素的生态循环方式将人类的排泄物回归土地,用于作物生长养分需要。而今日农村污水是现代文明催生的产物,若走城市污水处理的路线将使排泄物中营养物质不能回归土地,耕种只得依赖化肥。结果,磷矿几近耗竭、化石能源过度消耗、温室气体明显增多。相形之下,农村传统如厕、粪尿返田方式却是生态的,只是有些卫生瑕疵。从生态角度看,农村污水不是应不应该处理的问题,而是应不应该产生的命题。城市卫生、排水系统回归原生态习惯显然很不现实,但是,解决农村污水问题走什么样的路线则面临重大抉择。如果漠视近在土地咫尺的“肥水”资源,那只有步城市的后尘,将会与国家强调的生态文明建设背道而驰、渐行渐远。

从生态角度出发,对粪尿“肥水”中的养分价值、源分离粪尿及卫生回田、粪尿返田与有机农业、农村污水处理现状、转变政府投资方式等方面内容进行阐述,以维系和恢复原生态农业生产方式,顺应国际上已开始强调的“蓝色经济”^[2]发展模式。

1 粪尿“肥水”中养分价值

日均人排尿液体积是生活污水的1%~2%^[3-4],而粪便体积仅为尿液体积的10%^[4]。可见,粪、尿排量与生活灰水量相比微乎其微。Gajurel等^[4]研究表明,粪、尿中所含氮(N)、磷(P)、钾(K)及有机物(COD)分别占污水中相应含量的97%、90%、66%和59%。尿液作为粪、尿中养分的主要“浓缩液”,以尿素(75%~90%的N)、 PO_4^{3-} (95%~

100%的P)和K离子等极易被植物吸收利用的形式存在^[5],是农业生产中非常理想的农家肥,也是绿色食品的养分来源。粪便中所含的磷(P)和碳(C)对改良土壤结构、增肥保湿具有很好的促进作用^[6]。

每人每年排泄物中所含N、P、K养分分别为4.4 kgN/a、1.5 kg P_2O_5 /a和1.4 kg K_2O /a^[4]。研究表明,每人每年产生的尿液可供约0.5亩(1亩 $\approx 667 \text{ m}^2$,下同)农作物生长对养分的需求^[5];每人每年粪、尿中所含养分与生产250 kg谷物所需化肥相当,刚好是一个人1年所需谷物消耗量^[6]。2017年国民经济和社会发展统计公报及中国统计年鉴显示,目前我国农村实际常住人口约为5.7亿人,每年粪、尿中养分总含量达 $416.1 \times 10^4 \text{ t/a}$ ($250.8 \times 10^4 \text{ t/a}$ 氮肥、 $85.5 \times 10^4 \text{ t/a}$ 磷肥和 $79.8 \times 10^4 \text{ t/a}$ 钾肥),相当于2016年我国化肥施用折纯量($5984.1 \times 10^4 \text{ t/a}$)的7%。按照作物对N元素的需求^[7-8],每年仅农村常住人口粪、尿中的养分就可供 $836 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的小麦-玉米轮作种植。

2 粪尿源分离与卫生回田

如果不将体积<2%的粪、尿混入灰水,使之以卫生方式返田农用,不仅其中养分可就近利用,而且污水也没有了产生的根源,生活灰水只需进行简单处理或用于“干地”处理(如旱作灌溉)。传统农村旱厕粪尿回田方式尽管生态,但不卫生。为此,欧洲一些国家(瑞典、德国等)针对发展中国家设计了基于源分离理念的生态卫生排水系统,并在一些国家获得应用和推广^[9]。从如厕源头将粪便和尿液卫生分离^[10],不仅如同水厕一样解决了旱厕不卫生的问题,而且又保留了粪尿中的养分,也就最大程度上避免了农村污水产生问题。在南非,通过回收利用粪尿中养分而从中获利的企业已经出现,尿液被誉为“液体黄金”^[11]。

尿液是人体排泄物中所有养分浓缩液。新鲜尿液相对不含病原体,尿液传播疾病的风险主要来自与粪便交叉污染^[11-12]。尿液储存6个月以上即可大大降低病原菌含量,并达到农业安全使用的要

求^[12]。粪便不同于尿液,本身带有多种病原微生物,需经过堆肥发酵(传统农业中的沤肥池即此功效)达到无害化后方可使用^[6]。

其实,现代粪尿中药物、激素和重金属残留才是反对粪尿返田时最常见的说辞。关于尿液中药物和激素等潜在污染物的负面影响目前尚不清楚,即使现有污水处理技术也很难有效去除这样的污染物,污水处理后出水灌溉农田同样存在这样的问题。只有利用电渗析和纳滤膜过滤技术才有可能将常见药物残留从尿液/污水中去除,亦可采用臭氧氧化方式降解药物残留和激素成分。正常情况下,食物中重金属含量较低,使得排泄物中重金属含量远低于灰水中重金属含量。水环境中高含量的重金属主要来自化工、矿业等行业排放的废水,化肥使用和合成饲料才是土壤重金属的主要来源^[9]。因此,在市政污水处理不能有效去除药物残留和激素成分的情况下,过度强调粪尿中的药物残留和激素成分存在污染风险的说法显得非常牵强。如果今后市政末端污水处理全部采用电渗析、纳滤膜、臭氧等技术来应对药物残留和激素成分,那么,这些技术应用于农村粪尿相同成分的处理,在源头会更加经济、有效。

目前我国农村正在进行厕所革命,但“革命的对象”似乎并没有找准目标。显然,革命的对象应该是针对其卫生方面的负面作用,而不应否定其在生态方面的正面作用,更不应简单重蹈城市之覆辙,代之以冲水马桶方式予以解决。换句话说,农村厕所革命的结果不应再将“水冲厕所+污水处理”移植于农村。否则,不仅毁掉了几千年来形成的粪尿返田之生态习惯,而且政府投资/补贴建设的污水处理设施很可能“晒太阳”(地上式)或者“躲阴凉”(地下式)。目前国际上发展“蓝色经济”^[2]的思潮与行动正在悄然兴起,而粪尿返田这一极为朴素的蓝色经济在我国已施行,几千年来还未有因粪尿传播疾病而导致人口锐减、消亡现象。正是化肥使用才导致大多数农民开始撇弃粪尿种田的习惯,再加上政府部门片面将粪尿返田定义为“陋习”,这才导致“肥水”变成“废水”。

3 粪尿返田与有机农业

粪尿与灰水混合便产生污水,一旦不经处理进入水体则有可能导致营养物质大量累积而造成水体富营养化和黑臭水体等现象。目前我国农村普遍存在着一种矛盾现象:一方面是“肥水”外流水体,另一

方面是种田再施用化肥。农村出现污水并需要处理的原因在于农民弃用昔日“肥水”,像城市人一样切断了食物(营养源)与土地(营养汇)之间的循环,实际是走上了一条不可持续的“工业”农业,而不是祖先创造的生态农业。

现代农业中大量化学制品(化肥、农药)应用虽使粮食产量短期获得增产,但长期潜在的隐患已初露端倪,环境污染、生态破坏、资源耗竭、食品安全等问题不断出现,对人类生存环境和健康已构成极大威胁^[13]。事实上,粪尿“肥水”是一种优质的有机肥,在发展和维系安全无污染的有机农业方面优势明显。将粪尿中的养分纳入自然界物质循环系统是生态文明建设的基础,不仅可以减少农业对化肥的需求,更为重要的是可以最大程度地减少农村污水的产生和处理,避免水环境污染。粪尿返田用于有机农业生产是原生态文明下的产物,即使在现代农业的今天也具有相当的经济、环境与社会效益。

3.1 有机农业

现代有机农业是指在生产过程中完全不用或基本不用人工合成化肥、农药、土壤调节剂和畜禽饲料添加剂的农业生产体系,其核心是使用有机肥和生态病虫害防治措施,完全弃用化肥、农药^[14]。可见,我国自给自足小农经济下形成的原生态农业耕作方式实际上就是现代有机农业的雏形,或者说现代有机农业追求的目标与原生态农业殊途同归。正是粪尿返田的原生态耕作习惯才使中国几千年来土壤肥力和农业生态系统得以稳定维持。弃用粪尿而使之形成污水并处理排放与发展有机农业目标背道而驰,需要悬崖勒马。

3.2 经济效益

有机肥是缓释肥,其中营养成分释放与作物吸收往往不能同步,这便产生了有机农业“成本高、产量低、效益低”的误区。事实并非如此,在同等施用氮肥的情况下,有机种植产量并不比化肥种植产量低,个别作物产量甚至可达化肥种植的2~3倍^[15-16];有机作物产量主要与有机种植年限长短有关^[17-18]。有机肥作为缓释肥其养分释放确实比化肥显得缓慢,导致有机种植前期产量往往较低,但随着种植年限延长,有机种植产量将会逐渐接近化肥种植^[18]。此外,由于有机作物在生产过程中没有受到污染,与环境更为友善、产品更加安全,其市场销售价格往往是化肥产品的2~3倍,甚至有些会达到

10 倍以上,利润空间很大。

华北平原是我国主要的粮食产地之一,主要采用冬小麦-夏玉米轮作方式。河南开封某自然村进行有机作物种植,其经济利益可观,利润分析如表 1 所示^[19-23]。

表 1 有机作物种植模式下经济潜力分析

Tab. 1 Analysis of the economic potential with an organic farming mode

项 目		小麦		玉米	
		化肥	有机肥	化肥	有机肥
产量/(kg·亩 ⁻¹)		500	399	650	500
价格/(元·kg ⁻¹)		2.4	5	2.2	4.4
销售额/(元·亩 ⁻¹)		1 200	1 995	1 430	2 200
成本/ (元·亩 ⁻¹)	种子	64	76.8	55	66
	化肥、农药	163.4	—	225	—
	人工有机管理	—	300	—	300
	常规人工成本	362.6	362.6	466.2	466.2
	机械成本	127	127	105	105
	总成本	717	866.4	851.2	937.2
净收益/(元·亩 ⁻¹)		483	1 128.6	578.8	1 262.8
有机种植增收潜力/%		+ 134		+ 118	
注： 化肥方式作物产量与费用来自对农户种植数据实际调研;有机作物价格基于 2018 年市场价格。					

有机农业属于劳动力和技术密集型产业,其高成本主要体现在对劳动力需求和有机肥购买两个方面。乡村有着就近可得的大量廉价劳动力,以粪尿这种天然有机肥来发展有机农业可以最大程度地降低有机农业的生产成本。表 1 显示,尽管有机农业人工成本高于化肥农业,但最终两种种植方式下总投入成本并没有明显的差异。有机农业虽然短期内在产量上处于劣势,但由于有机农产品的价格远高于化肥农产品,这就使得有机种植最终往往有着远超化肥种植的利润空间。

3.3 环境效益

粪尿返田的环境影响远不止最大程度上减少农村污水产生而保护水体环境,可有效避免处理污水带来的投资、能耗和运行管理上的问题,更为重要的是可以因此而减少对难以再生磷资源的过度需求,并可减少因化肥生产过度耗能而产生的温室气体排放。此外,有机种植方式亦可大大减少土壤中甲烷(CH₄)和氮氧化物等温室效应更高的温室气体排放,还对 CO₂ 排放具有巨大的封存潜力。

3.3.1 缓解磷危机

现代食品生产主要靠使用大量化肥来维系。然

而,用于磷肥生产的磷矿将在未来 100 年内逐渐耗竭^[24],我国已探明的磷矿储量只能再使用 35 年^[10]。磷资源作为万物生长所必需的营养元素因其日益匮乏已被美国能源部认同为与镓、钽等同样重要的珍稀元素^[24]。

人的粪尿以及动物粪尿中的磷资源在国际上越来越被看重,被誉为人类的“第二磷矿”^[25]。从污水和畜禽粪便中回收磷的理念和行动已在欧美等国家相继开展,瑞士已成为世界上第一个立法强制从污水处理中回收磷(2016 年 1 月 1 日起实施)的国家^[26]。未雨绸缪的欧美国家对磷资源的重视与我国目前所强调的农村污水处理形成了鲜明对比。我国作为农业大国,祖先创造的粪尿返田之原生态文明习惯不正是欧美国家目前对环境、资源的追求目标?在我国目前的农村环境治理下,维持和恢复粪尿返田习惯显然可避免重走西方国家的老路,以最低的成本和代价以“一石两鸟”的方式同时解决农村的环境与资源问题。

3.3.2 减少温室气体排放

化肥其实是一种人工合成的耗能肥料,生产过程中因耗能会产生大量二氧化碳(CO₂)温室气体排放;我国仅与氮肥生产相关的温室气体排放量就占全国温室气体排放总量的 7%^[27]。因有机种植在生产过程中禁用化肥,这对因化肥生产造成的人为温室气体具有重要减排意义。如上所述,目前我国农村常住居民排泄物中可回收利用的营养相当于 416.1 × 10⁴ t/a 化肥;目前我国生产氮肥、磷肥、钾肥的平均 CO₂ 排放系数分别为 7.8 tCO₂/tN、2.3 tCO₂/tP₂O₅ 和 0.7 tCO₂/tK₂O^[28]。如果农村实际居住人口的粪尿全部返田利用,则因减少化肥生产所导致的温室气体排放量可达 2 209 × 10⁴ tCO₂/a,几乎与海南省全年温室气体排放量(2 699 × 10⁴ tCO₂/a)相当^[29]。

此外,农业作为我国温室气体的重要来源,贡献了我国 16% (农业生产直接排放与化肥生产间接排放)的温室气体排放量^[30]。农业生产过程中温室气体排放量与农业种植方式有关;研究表明,有机种植方式致全球变暖潜能值普遍低于化肥种植方式^[31]。目前国际上常用的农业温室气体排放量计算方法主要是依据肥料施用量,并未对不同种植方式下温室气体排放量予以区分。为定量比较不同耕作方式对温室气体排放的影响,根据不同耕作方式下产生的

温室气体排放测算,采用排放通量总外推法^[32]分析我国农村粪尿返田对温室气体减排的潜力,数据详见表2。

表2 不同种植方式下温室气体排放潜力

Tab.2 Emission potentials of greenhouse gases under different

farming modes		kg · hm ⁻²	
种植方式	N ₂ O 排放量	CH ₄ 排放量	折算 CO ₂ 排放量
有机种植	0.34 (105)	72.3 (1 518)	1 623
化肥种植	1.01 (313)	84.1 (1 766)	2 079

注: 括号内为折算 CO₂ 当量。

表2显示,与化肥种植方式相比,有机种植方式下CH₄和N₂O排放量均有不同程度减少(碳减排潜力分别为14%和66%),单位面积有机种植每年可减少22%的CO₂排放量当量。我国农村如维系粪尿返田,每年可供836 × 10⁴ hm²土地实施有机种植,则可减少CH₄和N₂O等温室气体排放约381 × 10⁴ tCO₂/a。此外,有机种植情况下土壤通过更新和补充有机质来调节土壤有机质平衡,对CO₂亦有巨大封存潜力。对土壤固碳潜能研究发现,有机种植下的土壤固碳量约为0.4 tC/(hm² · a)^[33],即可减少温室气体排放1.5 tCO₂/(hm² · a),可使粪尿返田下的有机种植对CO₂封存、减排量达1 254 × 10⁴ tCO₂/a;与CH₄和N₂O减排量加在一起共计1 635 × 10⁴ tCO₂/a。

由此可见,利用粪尿返田发展有机农业能够减少化肥和农业生产两个领域的双重温室气体排放,每年总减排量可达3 844 × 10⁴ tCO₂,占我国农业温室气体排放量(10 × 10⁸ tCO₂/a)^[30]的4%。这种低耗能、低排放、高碳汇的有机农业模式对我国实现温室气体减排目标的贡献不容小觑。

3.4 社会效益

有机农业作为一种生态健康产业,生产的绿色产品更加安全、健康,因此也大大提升了农产品的附加值,可为农户创造更多的经济利益,也是农户脱贫致富的有效途径之一。在农村,如果粪尿通过返田发展有机农业被重新看作“肥水”而不再混入灰水,这对农村环境的恢复和改善显然具有积极的影响,比形成污水后再处理更加省时、省力、省钱;国家只需鼓励和少量补贴便可驱动农民恢复昔日粪尿返田习惯,让农民因真正的有机种植而普遍获益甚至脱贫。往日不受待见的粪尿若能纳入政府的扶贫政策,卫生返田将会在收集、利用、种植、销售等各个环

节为农民带来就业岗位。同时,也可以通过培训、教育等方式来提高农村劳动力素质,并逐渐帮助农民培育出各自绿色农副产品品牌,建立起良好的社会信誉和稳定的销售体系。

4 农村污水处理现状

由于多数农户不再将粪尿看作“肥水”,加之一些政府部门亦片面强调农村旱厕为陋习,导致农民将粪尿与灰水混合而形成污水,结果导致目前农村环境脏乱差的现象。为应对农村污水问题,出现了众多污水处理技术,但归类发现,大都是市政污水处理技术的微缩版,甚至连市政污水处理备受质疑的MBR技术也应用于北京很多区县的农村。农村污水具有分散、量小的特点,集中处理首先要具备完善的收集、输送系统,即下水道系统。德国20世纪80年代市政污水处理率达96%时,下水道与污水处理设施投资比为7:3,即排水处理系统投资70%用于下水道建设,此比值对低密度的农村来说则显更大。可见,只强调污水处理而忽视下水管网建设的结果会普遍存在“远水解不了近渴”的问题,导致即使建成也会出现“晒太阳”“躲阴凉”的现象。我国已建农村污水处理设施情况表明,“晒太阳”“躲阴凉”现象确实十分普遍;官方此类报道已不胜枚举^[34]。加之农村污水处理设施规模小,运行成本普遍高于市政污水处理,甚至高达3元/m³以上^[35],这对难以征收污水处理费的农村来说亦很难维系正常运行。此外,技术管理也是农村污水处理的短板,将MBR等高新技术引入农村就好比让农民放卫星一样,简直就是天方夜谭。

5 转变政府投资方式

每年我国农村污水治理工程政府投资高达上百亿元,且逐年增加。面对农村污水处理设施“建而不用、建而不管”的普遍现象,应予以反思,否则,钱砸下去了,也有人靠“技术”致富了,但坑了的是国家和农村。因此,政府首先需要转变观念,打开“官智”,相应转变投资、补贴方式。观念转变需要重新审视粪尿返田之原生态文明习惯,肯定“肥水”的生态价值和将之返田的环境效应。只有这样,才可能将用于污水处理的巨额投资“缩水”,以少量经济补贴方式帮助和鼓励农民恢复粪尿返田习惯,直接促进农民发展全生态有机农业。为此,政府应建立相应生态补偿机制,全面调动财政、税收、行政等政策资源以及社会资源,积极引导农民利用粪尿进

行有机种植。政府亦可通过征收化肥税的方式来补贴粪尿返田。

粪尿卫生返田中病原菌控制最为关键。对此,政府应免费向农户提供科学沤肥、灭菌技术,改变传统简单、粗放的沤肥方式,实现沤肥科学化、标准化。粪尿返田发展有机农业往往在初期存在作物产量低、有机认证门槛高和农田生态修复投资等问题,政府在此方面应给予财政支持和政策扶持,以解除农民对有机种植产量低、存在销路风险的顾虑。

6 结语

农村污水处理过度强调传统旱厕在卫生方面的负面作用,完全漠视粪尿作为“肥水”的生态价值。既有农村污水处理设施大都“晒太阳”“躲阴凉”的事实说明,处理并不太适合于农村,特别是移植城市的处理技术。如果能重新认识粪尿“肥水”的生态价值并维系和恢复原生态文明下的粪尿返田习惯,不仅可以发展有机农业,亦可从根本上解决污水产生现象,从而最大程度地避免农村污水处理怪象。

源分离粪尿技术可助“肥水”卫生返田;粪尿返田是发展有机农业生产绿色食物的最佳养分;粪尿返田有助于缓解磷危机现象;有机种植不仅可以大大减少因化肥生产耗能排放的 CO_2 温室气体,土壤还可减少 CH_4 和 N_2O 等温室气体排放并封存大量 CO_2 ;有机种植亦可帮助困难地区农民脱贫,甚至致富。因此,粪尿“肥水”返田有着明显的环境、社会和经济效益。前提是政府部门应该首先转变观念,出台鼓励和扶持政策,变投资污水处理设施为补贴粪尿返田,通过杠杆调节方式驱动和帮助农民卫生返田及有机种植。

蓝色经济已成为国际开始倡导的未来发展模式,其核心内容就是发展纳入生态体系的循环经济。这与中华文明五千年历史创造的粪尿返田原生态习惯殊途同归,或者说粪尿返田就是最朴素的蓝色经济。在发达国家发展模式已开始“回头看”的今天,在我国农村污水治理基本上还是一张白纸之时,绝不是聚焦选择所谓“适宜”处理技术的最佳时候,而是应停下来看看国际、反思自己的关键时刻。不然,走错路、投错资的生态环境代价日后将难以弥补。

参考文献:

[1] 鞠昌华,张卫东,朱琳,等. 我国农村生活污水治理问题及对策研究[J]. 环境保护,2016,44(6):49-52.

Ju Changhua, Zhang Weidong, Zhu Lin, *et al.* China's rural sewage treatment problems and countermeasures [J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(6): 49-52 (in Chinese).

[2] 郝晓地,李天宇,Mark van Loosdrecht,等. 蓝色经济下的水技术变革[J]. 中国给水排水,2017,33(2):5-12.

Hao Xiaodi, Li Tianyu, Mark van Loosdrecht, *et al.* Reform of water technologies under blue economy [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(2): 5-12 (in Chinese).

[3] Walker R L, Beadsworth A S. The potential of source-separated human urine to be used as a partial replacement for synthetic fertilisers [J]. *Aspects Appl Biol*, 2011, 109: 171-176.

[4] Gajurel D R, Li Z, Otterpohl R. Investigation of the effectiveness of source control sanitation concepts including pre-treatment with Rottebehalter [J]. *Water Sci Technol*, 2003, 48(1): 111-118.

[5] Mihelcic J R, Fry L M, Shaw R. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 832-839.

[6] Heinonen-Tanski H, van Wijk-Sijbesma C. Human excreta for plant production [J]. *Bioresour Technol*, 2005, 96(4): 403-411.

[7] 李书田,刘晓永,何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6): 1416-1432.

Li Shutian, Liu Xiaoyong, He Ping. Analyses on nutrient requirements in current agriculture production in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(6): 1416-1432 (in Chinese).

[8] 岳现录. 华北平原小麦-玉米轮作中有机肥的氮素利用与去向研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009.

Yue Xianlu. Study on Nitrogen Fate and Efficiency of Organic Manure in Wheat - Maize Rotation in North China Plain [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009 (in Chinese).

[9] Simha P, Ganesapillai M. Ecological sanitation and nutrient recovery from human urine: How far have we come? A review [J]. *Sust Environ Res*, 2017, 27(3): 107-116.

[10] 郝晓地,周健,张健. 源分离生态效应及其资源化技术[J]. 中国给水排水,2016,32(24):20-27.

Hao Xiaodi, Zhou Jian, Zhang Jian. Ecological effects of source separation and associated technologies towards

- resource [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (24): 20–27 (in Chinese).
- [11] Randall D G, Naidoo V. Urine: The liquid gold of wastewater [J]. *J Environ Chem Eng*, 2018, 6 (2): 2627–2635.
- [12] Karak T, Bhattacharyya P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2011, 55 (4): 400–408.
- [13] 曹幸穗. 大众农学史[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2015.
- Cao Xingsui. Popular Agricultural History [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2015 (in Chinese).
- [14] 刘世梁, 尹艺洁, 安南南, 等. 有机产业对生态环境影响的全过程分析与评价体系框架构建[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (7): 793–802.
- Liu Shiliang, Yin Yijie, An Nannan, *et al.* Full process analysis and evaluation system construction for ecological and environmental effects of organic industry [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23 (7): 793–802 (in Chinese).
- [15] 宋东涛. 三种有机肥在土壤中的转化及对有机蔬菜生长效应的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- Song Dongtao. Transformation of Manure in Soil and Effect on the Growth of Organic Vegetable [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008 (in Chinese).
- [16] 沈茂华, 和文龙, 严少华, 等. 有机栽培、特别栽培对4种蔬菜产量和品质的影响[J]. *江苏农业学报*, 2010, 26 (4): 729–734.
- Shen Maohua, He Wenlong, Yan Shaohua, *et al.* Effects of organic farming and special farming on the yield and quality of four kinds of vegetables [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26 (4): 729–734 (in Chinese).
- [17] 科学技术部中国农村技术开发中心组. 有机农业在中国[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
- China Rural Technology Development Center, Ministry of Science and Technology. Organic Agriculture in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006 (in Chinese).
- [18] 唐政, 陈小香. 有机农业与常规农业作物产量比较研究[J]. *农业环境与发展*, 2012 (4): 7–10.
- Tang Zheng, Chen Xiaoxiang. Comparative study on yield of organic agriculture and conventional agricultural crops [J]. *Agro-Environment and Development*, 2012 (4): 7–10 (in Chinese).
- [19] 封雪. 不同栽培方式对小麦产量、土壤肥力特性及养分流失的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- Feng Xue. The Effects of Different Farming Systems on Wheat Yield, Soil Fertility Properties and Nutrients Loss [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012 (in Chinese).
- [20] 张建康, 董广, 张钟, 等. 有机种植玉米品种比较试验研究[J]. *农业科技通讯*, 2015 (5): 53–55.
- Zhang Jiankang, Dong Guang, Zhang Zhong, *et al.* Comparative experimental study on organically grown maize varieties [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015 (5): 53–55 (in Chinese).
- [21] 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[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- Price Department of the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. China's Agricultural Product Cost-benefit Data Compilation [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015 (in Chinese).
- [22] 钱静斐, 邱国梁. 农户从事有机蔬菜生产的经济效益——基于山东肥城有机花菜种植农户的调研[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 (12): 497–501.
- Qian Jingfei, Qiu Guoliang. Economic benefits of farmers engaged in organic vegetable production based on the investigation of organic cauliflower farmers in Feicheng, Shandong Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 (12): 497–501 (in Chinese).
- [23] 田堃. 黑龙江省有机种植现状与效益评估[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- Tian Kun. Planting Status and Benefit Evaluation of Organic Agriculture in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [24] Elser J, Bennett E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle [J]. *Nature*, 2011, 478 (7367): 29–31.
- [25] 郝晓地, 衣兰凯, 王崇臣, 等. 磷回收技术的研发现状及发展趋势[J]. *环境科学学报*, 2010, 30 (5): 897–907.
- Hao Xiaodi, Yi Lankai, Wang Chongchen, *et al.* Situation and prospects of phosphorus recovery techniques [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (5): 897–907 (in Chinese).
- [26] 郝晓地, 宋鑫, Mark van Loosdrecht, 等. 政策驱动欧洲磷回收与再利用[J]. *中国给水排水*, 2017, 33

- (8):35-42.
Hao Xiaodi, Song Xin, Mark van Loosdrecht, *et al.* Phosphorus recovery and reuse driven by policies in Europe[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(8): 35-42 (in Chinese).
- [27] Zhang W, Dou Z, He P, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *PNAS*, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [28] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6371-6383.
Chen Shun, Lu Fei, Wang Xiaoke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6371-6383 (in Chinese).
- [29] 姚丽芳, 周聿喆. 我国温室气体排放的区域现状研究[J]. *上饶师范学院学报*, 2011, 31(6): 62-67.
Yao Lifang, Zhou Yuzhe. Study on regional status of greenhouse gas emissions in China [J]. *Journal of Shangrao Normal College*, 2011, 31(6): 62-67 (in Chinese).
- [30] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105.
Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105 (in Chinese).
- [31] 王宏燕, 宋冰冰, 聂颖, 等. 有机种植对盐碱土壤 N_2O 、 CO_2 排放通量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(9): 1580-1587.
Wang Hongyan, Song Bingbing, Nie Ying, *et al.* Effect of organic farming on emissions of carbon dioxide and nitrogen oxide in alkali saline soil [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(9): 1580-1587 (in Chinese).
- [32] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N_2O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7-13.
Zhang Qiang, Ju Xiaotang, Zhang Fusuo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7-13 (in Chinese).
- [33] 刘月仙, 吴文良, 蔡新颜. 有机农业发展的低碳机理分析[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 441-446.
Liu Yuexian, Wu Wenliang, Cai Xinyan. Analysis of potentials of greenhouse gas emissions reduction and soil carbon sequestration in organic agriculture [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 441-446 (in Chinese).
- [34] 李宪法, 许京骐. 北京市农村污水处理设施普遍闲置的反思(I) [J]. *给水排水*, 2015, 41(6): 48-50.
Li Xianfa, Xu Jingqi. Reflection on the general idleness of rural sewage treatment facilities in Beijing (I) [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(6): 48-50 (in Chinese).
- [35] 刘平养, 沈哲. 基于生命周期的农村生活污水处理的成本有效性研究——以浙江省白石镇为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(12): 2604-2610.
Liu Pingyang, Shen Zhe. Cost effectiveness of rural wastewater treatment based on lifecycle cost analysis [J]. *Resources Science*, 2014, 36(12): 2604-2610 (in Chinese).



作者简介:郝晓地(1960-),男,山西柳林人,博士,教授,从事市政与环境工程专业教学与科研工作,主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术,现为国际水协期刊《Water Research》区域主编(Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2019-02-06